

Treball de Fi de Màster

Màster Universitari en Enginyeria Industrial

Disseny i construcció d'una plataforma docent per l'assaig de bateries electroquímiques

MEMÒRIA

Autor: Daniel Moreno Fernández
Director: Francisco Díaz González
Convocatòria: 01 2018



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

Com ja es sap, s'està plantejant, a nivell mundial, un canvi de model energètic amb el qual fer front al canvi climàtic on, es proposa l'augment de la generació d'energia mitjançant l'ús de renovables en detriment de les centrals tèrmiques. D'aquesta forma s'espera poder reduir les emissions de gasos hivernacle. Conjuntament amb aquestes mesures, es proposa un canvi del model de mobilitat potenciant els automòbils que incorporen tecnologies híbrides o elèctriques en vers els motor tèrmics que generen gran quantitat d'emissions d'aquests gasos sobretot a les grans ciutats.

Aquests canvis de models planteja la necessitat d'emmagatzemar energia elèctrica per poder gaudir-ne d'ella sota demanda. Existeixen múltiples tecnologies que permeten l'emmagatzematge d'energia, en forma d'energia mecànica, elèctrica o química. Les bateries electroquímiques són una solució a la necessitat plantejada.

Per aquest motiu, aquest treball planteja el disseny i construcció d'una plataforma que permeti assajar aquestes bateries realitzant cicles de càrrega i descàrrega. Aquesta eina ha de possibilitar l'estudi de les bateries assajades per millorar el seu comportament. El disseny i construcció es recolzarà en una eina disponible al CITCEA-UPC originàriament dissenyada pel control de motors.

La memòria del projecte proposa el disseny d'un sistema de càrrega i descàrrega per assajar les bateries. El sistema de càrrega es realitza mitjançant un pont en H amb modulació UPWM amb un filtre LC controlat per dos llaços de control que permeten una metodologia de càrrega CC/CV de la bateria que s'encarrega d'evitar sobrecorrents i sobretensions a la bateria. La descàrrega es dissenya d'una forma més senzilla mitjançant la dissipació de l'energia a través d'una resistència amb un control proporcional.

Mitjançant el programari Simulink, de MatLab, es realitzen les simulacions oportunes per comprovar els aspectes teòrics presentats i que els sistemes plantejats funcionen segons s'espera.

Finalment, es donen les pautes per construir la nova plataforma a partir de l'eina existent al departament i les conclusions que s'extreuen després de la realització d'aquest treball.

Sumari

RESUM	1
SUMARI	3
SUMARI DE FIGURES	7
SUMARI DE TAULES	9
1. PREFACI	11
1.1. Origen del projecte	11
1.2. Motivació	12
2. INTRODUCCIÓ	13
2.1. Objectius del projecte	13
2.2. Abast del projecte	13
3. SISTEMES D'EMMAGATZEMATGE D'ENERGIA	15
3.1. Emmagatzematge d'energia mecànica	15
3.1.1. CAES	15
3.1.2. PHS	16
3.1.3. Flywheels	17
3.2. Emmagatzematge d'energia elèctrica	17
3.2.1. Supercondensadors	17
3.2.2. Sistema d'emmagatzematge per superconducció magnètica	17
3.3. Emmagatzematge d'energia química	18
3.3.1. Piles de combustible	18
3.3.2. Bateries de flux	18
3.3.3. Bateries convencionals	19
3.3.3.1. Bateria Plom-àcid (Pb-àcid)	19
3.3.3.2. Bateria Níquel-Cadmi (Ni-Cd) i Níquel-Metall hidrur (Ni-MH)	20
3.3.3.3. Bateria Sulfur de sodi (Na-S)	20
3.3.3.4. Bateria Liti-ió (Li-ion)	21
4. PLATAFORMA DOCENT	23
4.1. Elements de la plataforma	23
4.1.1. eZdsp TMS320F2812	24
4.1.2. CDM2480	24
4.2. Funcionament	25

5. PLATAFORMA DOCENT D'ASSAIG DE BATERIES	27
5.1. Introducció	27
5.2. Bateria Ió-Liti	27
5.3. Metodologia de càrrega	29
5.4. Convertidor estàtic: Pont H	31
5.5. Filtre LC	34
5.5.1. Condicions de disseny del filtre	35
5.5.2. Càlcul de filtre	35
5.6. Element dissipatiu	37
5.6.1. Càlcul de la resistència	37
5.6.2. Interruptor controlat	38
5.7. Control	38
5.7.1. Llaç de control de corrent	39
5.7.2. Llaç de control de tensió	40
5.7.3. Càlcul dels paràmetres de control del procés de càrrega	41
5.7.3.1. Factor d'amortiment	41
5.7.3.2. Freqüència natural no amortida	42
5.7.3.3. Paràmetres controlador PI	43
5.7.4. Control de descàrrega	43
5.8. Sistema de gestió de la bateria	44
5.9. Proposta de la solució	45
5.10. Simulació	45
5.10.1. Simulació amb el pont en H	46
5.10.1.1. Configuració del model	46
5.10.1.2. Simulacions	47
5.10.2. Simulació sense el pont en H	49
5.10.2.1. Configuració del model	50
5.10.2.2. Simulacions	50
5.10.3. Simulació descàrrega bateria	51
5.10.3.1. Configuració del model	51
5.10.3.2. Simulacions	52
5.10.4. Conclusió de les simulacions	53
6. IMPLEMENTACIÓ	55
6.1. Viabilitat	55
6.2. Conclusions de la viabilitat del projecte	56

CONCLUSIONS	57
AGRAÏMENTS	59
BIBLIOGRAFIA	61
ANNEX	63

Sumari de figures

Figura 4-1: Esquema de funcionament CAES [9].	16
Figura 4-2: Esquema de funcionament PHS [10].	16
Figura 4-3: Bateria de flux de redox de vanadi [10].	18
Figura 4-4: Esquema del principi de funcionament d'una bateria Li-ion [11].	19
Figura 4-5: Comparativa de densitats de diferents dispositius d'emmagatzematge d'energia [11].	22
Figura 5-1: Plataforma docent pel control de motors mitjançant un DSP.	23
Figura 5-2: Placa de potència CDM2480 distingint les diferents parts que la conformen.	24
Figura 6-1: Diagrama orientatiu de la plataforma d'assaig de bateries.	27
Figura 6-2: Corbes de càrrega d'una cel·la de bateria aplicant la càrrega CC-CV [12].	30
Figura 6-3: Topologia del convertidor estàtic: Pont H.	31
Figura 6-4: Modulació BPMW utilitzant una ona triangular portadora [13].	32
Figura 6-5: Modulació UPWM utilitzant una ona triangular portadora [13].	33
Figura 6-6: Topologia del pont H amb el filtre LC a la sortida del convertidor amb la bateria.	34
Figura 6-7: Topologia del sistema de descàrrega.	37
Figura 6-8: Sistema de control en cascada per la gestió de càrrega de una bateria Li-ion.	39
Figura 6-9: Control de corrent del inductor.	40
Figura 6-10: Resposta per una entrada esglaó d'un sistema de segon grau per a diferents valors de ξ .	42
Figura 6-11: Topologia de la proposta de solució	45
Figura 6-12: Esquema de simulació sense els elements de mesura i control.	46
Figura 6-13: Model simulat	47

Figura 6-14: Corrent al inductor.	47
Figura 6-15: Senyals PWM.	48
Figura 6-16: Senyals de porta del pont en H.	49
Figura 6-17: Evolució del control PI de corrent.	49
Figura 6-18: Model simplificat simulat	50
Figura 6-19: Comparatiu entre càrrega estàndard, en verd, i càrrega ràpida, en taronja.	51
Figura 6-20: Model per la simulació de descàrrega de bateria.	51
Figura 6-21: Model del subsistema de la Figura 6-20.	51
Figura 6-22: Corbes de descàrrega de la bateria. En groc, utilitzant una resistència de $3,3\ \Omega$. En blau, utilitzant una resistència de $4\ \Omega$. Cicle de treball constant màxim en ambdós casos.	52
Figura 7-1: Pont trifàsic complet de la placa de potència.	55
Figura 7-2: Esquema del muntatge.	56

Sumari de taules

Taula 6-1: Taula resum de les característiques de la cel·la ICR18650-22E. _____ 28

Taula 6-2: Taula resum de les característiques de la bateria composta per tres cel·les en sèrie ICR18650-22E. _____ 29

Taula 6-3: Condicions de disseny del filtre. _____ 35

1. Prefaci

1.1. Origen del projecte

Durant els últims anys hi ha hagut una creixent preocupació pel canvi climàtic que està ocorrent a tot el món ocasionat per la gran quantitat d'emissions de gasos hivernacle. Reduir aquestes emissions s'ha convertit en un desafiament a nivell mundial per tal d'evitar que la temperatura mitjana del planeta terra continuï creixent. S'han produït acords a nivell mundial, sota el marc de la convenció pel canvi climàtic de les Nacions Unides, el compromís d'una gran majoria de països de deixar d'utilitzar centrals tèrmiques de carbó en els pròxims anys per a la generació d'energia elèctrica [1].

Tots els compromisos han desembocat cap a una transició energètica. Un canvi en l'estructura del sistema energètic a nivell mundial [2]. Aquesta transició, entre altres aspectes, busca potenciar l'ús d'energies renovables com és l'eòlica, hidroelèctrica, fotovoltaica o geotèrmica. La major problemàtica d'algun d'aquests sistemes, com són la eòlica o la fotovoltaica, és que no són un sistema de generació d'energia elèctrica sota demanda. Generen electricitat en funció del vent o la radiació solar que es produeix durant el dia. Aquesta generació pot coincidir o no amb la demanda de la població. És en aquest punt, on es necessita emmagatzemar l'energia generada per poder-la consumir en el moment desitjat.

S'estan prenent altres mesures per part de països de la Unió Europea; una d'elles és la prohibició de venda de vehicles amb motor tèrmic en un període de 10 a 25 anys. Grans ciutats europees estan restringint el trànsit a vehicles que es mouen amb motors de benzina o dièsel per la gran quantitat d'emissions de CO₂ i NO_x, amb la voluntat d'anar augmentant aquestes restriccions en el temps, per evitar que els cotxes més antics i més contaminants contaminin els centres de les ciutats, on cada vegada més, la pol·lució té major presència. Al mateix temps que comencen a existir restriccions contra aquest tipus de mobilitat, també s'està impulsant cap a una transició de mobilitat electrificada, promovent la venda de vehicles elèctrics o híbrids endollables [3]. El repte més gran que suposa aquest tipus de cotxes és precisament emmagatzemar l'energia en bateries [4].

Com s'ha vist en els casos exposats, emmagatzemar energia elèctrica a gran escala per poder consumir-la en el moment desitjat o de necessitat és un repte de la societat actual. El repte que presenta les bateries per poder emmagatzemar energia són: la seguretat; la vida mitjana (mesurat en el nombre de cicles de carrega i descarrega i generalment la duració d'aquesta); el rendiment (especialment a altes i baixes temperatures, la mesura de l'estat de càrrega i la gestió de la temperatura); l'energia específica (la quantitat d'energia que pot emmagatzemar per quilogram de pes); potència específica (quina potència pot emmagatzemar per quilo de

pes); i el cost [4] [5].

Els sistemes de bateries per l'emmagatzematge d'energia, juga un paper important en aquesta transició energètica i ha de respondre a les necessitats de l'usuari oferint un bon rendiment.

Generalment, els sistemes de bateries van acompanyats de convertidors de potència. Els convertidors s'ocupen tant de la càrrega com la descàrrega de la bateria en les condicions desitjades de tensió i corrent i, per tant, potència que s'injecta o entrega la bateria, al propòsit per a la que estigui destinada [6]. Els convertidors de potència, basats en l'electrònica, poden ser dissenyats per una ràpida resposta, amb una regulació que ofereixi un baix transitori i uns arrissats de tensió i corrent ajustats a les necessitats del dispositiu. Per les raons donades prèviament, els convertidors de potència també tenen cabuda en aquest estudi.

Prèviament, al departament d'enginyeria elèctrica, dins del CITCEA-UPC, s'han desenvolupat eines de docència que ajuden a l'aprenentatge al voltant de l'electrònica de potència aplicada al motors elèctrics.

Ara, es proposa l'aplicació d'aquestes eines existents, complementades amb el disseny de noves, aplicades a l'assaig de sistemes de bateries, degut als motius exposats.

1.2. Motivació

Tenint en compte els fets exposats al Prefaci, adquireix una gran importància desenvolupar plataformes per facilitar l'assaig de bateries electroquímiques per fer front al repte de millorar la seva seguretat, densitat de càrrega, temps de càrrega, rendiment i altres factors, i alhora que permeti formar a nous enginyers i enginyeres en el camp d'emmagatzematge d'energia en sistemes de bateries electroquímiques, així com en el control de l'electrònica de potència que porta associat aquests tipus de sistemes.

Aquesta plataforma, primerament, m'ha de permetre poder aplicar els meus coneixements adquirits durant la meva etapa d'estudis universitaris, tant del grau com de màster, en quant a l'electrònica de potència. Realitzar un estudi sobre els sistemes d'emmagatzematge d'energia, que tant importants es mostren de cara al futur proper i contribuir a desenvolupar una plataforma experimental per l'assaig de bateries per a la docència.

2. Introducció

En el capítol previ s'han exposat els motius pels quals les bateries electroquímiques en els pròxims anys tindran un paper important en el canvi de model energètic i de mobilitat. Aquestes raons són per les quals es creu que és necessari disposar de plataformes que ens permetin assajar les bateries i estudiar els seus cicles de càrrega i descàrrega per tal de millorar el seu comportament.

En aquest apartat s'exposa quins seran els objectius del projecte i el seu abast per tal de dissenyar i construir una plataforma docent per l'assaig de bateries electroquímiques.

2.1. Objectius del projecte

L'objectiu principal d'aquest projecte és dissenyar una plataforma experimental per l'assaig de bateries per a la docència a partir d'una plataforma prèvia dissenyada pel CITCEA-UPC, la qual està enfocada al control de motors.

La nova plataforma experimental es desenvoluparà aprofitant al màxim les possibilitats que ofereix la plataforma existent i s'adaptarà a aquesta en tot el possible amb la finalitat que la nova plataforma pugui realitzar cicles de càrrega i descàrrega controlats a les bateries.

Tanmateix, té com objectiu presentar un resum de l'estat actual de les tecnologies d'emmagatzematge d'energia per comprendre millor la importància del paper que juguen les bateries en aquesta transició de model energètic exposat al Prefaci.

2.2. Abast del projecte

El present projecte es pot dividir en diferents seccions. Estudi dels sistemes d'emmagatzematge d'energia, descripció de la plataforma docent existent, disseny teòric del sistema de càrrega i descàrrega així com la metodologia de control per aquests sistemes, implementació del disseny i les conclusions del conjunt del treball.

Per comprendre la situació actual en la que es troben les bateries es realitza un resum de l'estat actual de les diferents tecnologies emprades a l'hora d'emmagatzemar energia, quines són les seves principals característiques i per a quines aplicacions s'adrecen.

Prèviament a començar el disseny teòric de la nova plataforma s'explica la plataforma de control de motors de la que partim per realitzar aquest projecte. La finalitat en aquest punt és aprofitar les eines existents sempre i quan el disseny existent ho permeti.

Seguidament es realitza un estudi en el qual es justifiqui les topologies emprades pel disseny de la plataforma; càlcul de cadascun dels elements que incorpora; exposar els paràmetres de control que ha d'utilitzar i realitzar les simulacions adients per validar el disseny teòric d'aquesta plataforma.

Un cop validat el disseny teòric, es realitza una pauta a seguir per implementar i construir un prototip de la nova plataforma juntament amb l'existent i les conclusions arribades en aquest apartat.

Finalment s'exposen les conclusions del conjunt del projecte.

3. Sistemes d'emmagatzematge d'energia

L'energia elèctrica es pot convertir en altres formes d'energia per emmagatzemar-la i posteriorment, alliberar aquesta energia per transformar-la de nou en energia elèctrica per fer-ne ús d'ella en el moment desitjat.

Els sistemes d'emmagatzematge d'energia (ESS, de les seves sigles en anglès) es poden classificar, principalment, en tres ESS: Mecànic, elèctric i químic [7] [8].

3.1. Emmagatzematge d'energia mecànica

Troben exemples com és l'emmagatzematge d'energia a través de l'aire comprimit (CAES, de les seves sigles en anglès), que de la mateixa manera que els sistemes d'emmagatzematge per bombeig d'aigua (PHS, de les seves sigles en anglès) emmagatzemen energia potencial.

Mentre, per una altra banda els volants d'inèrcia (Flywheels, en anglès) emmagatzemen energia cinètica.

3.1.1. CAES

Els sistemes d'aire comprimit poden emmagatzemar altes quantitats d'energia. Tradicionalment, per augmentar l'eficiència, l'aire comprimit és utilitzat amb gas natural.

L'aire comprimit és emmagatzemat en una cambra sota terra, en condicions de temperatura ambient però altes pressions. Aquest es mescla amb el gas natural. Quan es necessita generar energia elèctrica s'extreu el aire comprimit de la cambra, s'escalfa, a través d'un intercanviador de calor, i posteriorment s'expansiona a través d'una turbina d'alta i una altra de baixa pressió. Aquesta expansió provoca una rotació a l'eix del generador que és el que injecta l'energia produïda a la xarxa elèctrica adient.

Existeixen només dos instal·lacions d'aquest tipus al món, una a Alemanya, amb una potència instal·lada de 290 MW i una altra a Alabama, Estats Units, amb una potència instal·lada de 110 MW [7]. La Figura 3-1 mostra un esquema descriptiu del funcionament del sistema CAES que es va instal·lar a Alabama [9].

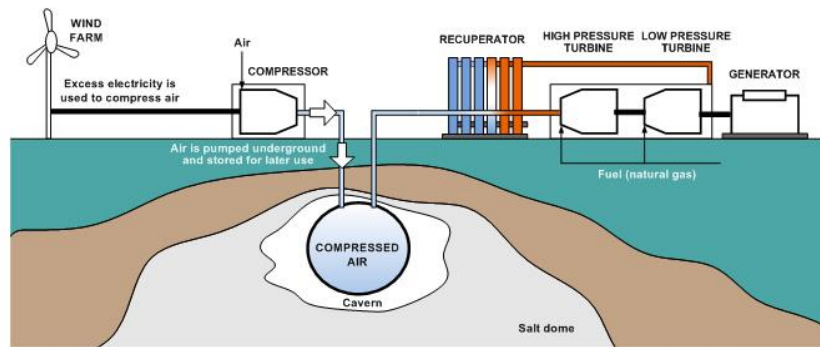


Figura 3-1: Esquema de funcionament CAES [9].

3.1.2. PHS

L'emmagatzematge d'energia per bombeig d'aigua és la tecnologia més madura de les que s'exposen en el present treball. És la tecnologia més utilitzada en sistemes d'emmagatzematge d'energia de gran potència. Amb més de 130 GW de potència instal·lada a tot el món [8].

Consisteix en dos grans embassaments d'aigua a diferents altures i una sèrie de bombes i turbines. Durant els pics de baixa demanda elèctrica es bombeja l'aigua de l'embassament inferior al superior i s'emmagatzema per fer-ne ús quan es necessita. L'aigua de l'embassament superior és alliberada a través de les turbines (quan es necessita generar electricitat), les turbines estan connectades a generadors que són els encarregats de transformar l'energia de rotació de la turbina en electricitat [10]. El seu funcionament és molt similar al funcionament d'un sistema hidroelèctric tradicional. La Figura 3-2 mostra un esquema descriptiu del funcionament del sistema PHS.

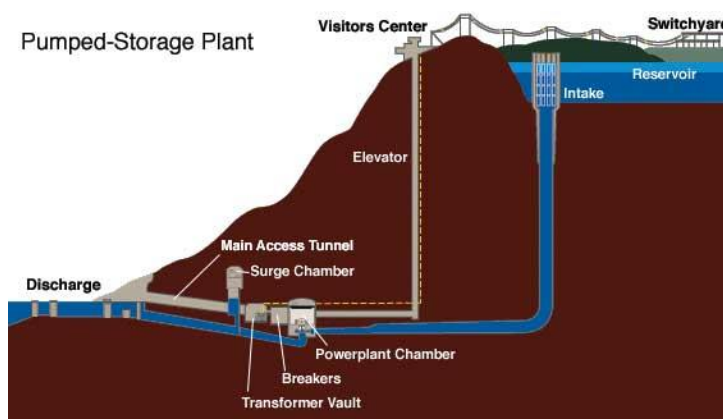


Figura 3-2: Esquema de funcionament PHS [10].

3.1.3. Flywheels

Els sistema de volants d'inèrcia d'emmagatzematge d'energia (FEES, de les seves sigles en anglès), emmagatzemen energia cinètica en un disc rotant acoblat a l'eix d'una màquina. Quan la màquina accelera l'energia és transferida al volant i emmagatzemada en forma d'energia cinètica. Quan la màquina es desaccelera o funciona en mode regeneratiu, el volant descarrega la seva energia a l'eix, el rotor, així com el volant, va disminuint la seva velocitat fins que arriba al punt d'aturar-se.

3.2. Emmagatzematge d'energia elèctrica

3.2.1. Supercondensadors

Els supercondensadors (Condensadors elèctrics de doble capa) poden ser carregats considerablement ràpid i tenen una vida fins a 5 cops superior en comparació als sistemes químics [8]. Consisteixen en dues plaques paral·leles que estan separades per un material dielèctric, en els supercondensadors el material dielèctric sol ser una capa molt fina de polímers i l'elèctrode nano tubs de carboni. Al aplicar una tensió entre els elèctrodes, els elèctrodes i el electròlit són polaritzats, així doncs, les plaques tenen càrregues oposades que indueixen un camp elèctric, en el qual l'energia és emmagatzemada [7] [10].

El principal desavantatge d'aquest sistema és que tenen una baixa densitat d'energia, cost elevat i, pes superior i empaquetat voluminós en comparació amb les bateries convencionals [10].

3.2.2. Sistema d'emmagatzematge per superconducció magnètica

Aquest tipus de sistema (SMES, de les seves sigles en anglès), l'energia és emmagatzemada en un camp magnètic. Aquest camp magnètic és creat per un corrent continu que travessa una bobina superconductora que es manté a temperatures que oscil·len entre el zero absolut i -123°C . Hi ha dos tipus de SMES en funció de la temperatura a la que treballa. SMES baixes temperatures, entre 10K i 150K ($-263,15^{\circ}\text{C}$ i $-123,15^{\circ}\text{C}$), i SMES altes temperatures, entre 0K i 7,2K ($-273,15^{\circ}\text{C}$ i $-265,95^{\circ}\text{C}$). Els materials superconductors presenten una resistència quasi negligible mentre es trobin a les temperatures esmentades. És aquest fet el que fa que es pugui mantenir el camp magnètic amb pèrdues molt baixes.

El major avantatge d'aquest sistema és la capacitat d'injectar o absorbir grans quantitats d'energia en un temps reduït. En aquest aspecte poden competir amb els supercondensadors. No obstant, el principal desavantatge del sistema és la seva sensibilitat a la temperatura perquè, tal i com s'ha comentat, la bobina s'ha de mantenir a molt baixes temperatures.

Com a resultat de les característiques, SMES és molt útil per solucions d'alta potència degut a la seva velocitat d'injecció o absorció d'energia però no és recomanat aplicacions cícliques com poden ser aplicacions de renovables degut a l'alt consum d'energia per a mantenir el sistema de refrigeració [7] [10].

3.3. Emmagatzematge d'energia química

3.3.1. Piles de combustible

Les piles de combustible de conversió d'energia electroquímica es presenten en diferents formats on principalment difereixen en el electròlit utilitzat. També ho fan en altres paràmetres com poden ser: disseny, rang de temperatura i aplicació per al que està destinat. Tenen una alta densitat d'energia, ràpida resposta i un alt cicle de vida. Poden ser utilitzats per grans i petites aplicacions però presenten un alt cost econòmic i una baixa eficiència [7] [8].

3.3.2. Bateries de flux

El sistema d'emmagatzematge d'energia de bateries de flux (FBESS, de les seves sigles en anglès), el seu principi de funcionament està basat en les reaccions electroquímiques que ocorren en les cel·les electroquímiques. Les bateries difereixen de les bateries convencionals en que l'electròlit no està permanentment a les cel·les, en el seu lloc, dos solucions aquoses electrolítiques estan contingudes en dos dipòsits. Durant el procés de càrrega, les solucions aquoses són impulsades cap a les cel·les, on el material electroquímic és dissolt en l'electròlit positiu és oxidat al ànode i el material electroquímic en l'electròlit negatiu és reduït al càtode. En el cas de la descàrrega ocorre el procés contrari. Un exemple és el que es troba a la Figura 3-3, on es visualitza una bateria de flux per una reducció-oxidació del Vanadi [7] [10].

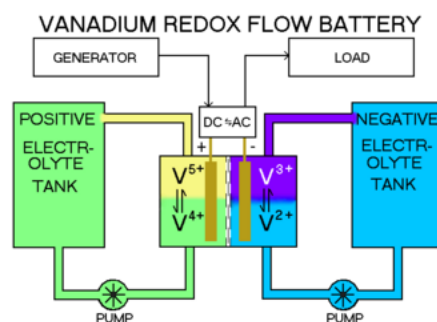


Figura 3-3: Bateria de flux de redox de vanadi [10].

3.3.3. Bateries convencionals

Els sistemes de bateries per l'emmagatzematge d'energia (BESS, de les seves sigles en anglès), converteix l'energia elèctrica en potencial químic mentre es carrega, i allibera energia elèctrica a partir de l'energia química quan es descarrega. En termes generals, està basat una reacció d'oxidació-reducció. Durant el procés de reducció electroquímica la bateria guanya electrons, mentre que en el procés d'oxidació electroquímica perd electrons.

Una cel·la de bateria és el component que permet i atorga les condicions perquè les reaccions de reducció-oxidació es donin, i generar un flux de ions i electrons entre les diferents parts de la bateria.

La bateria està composta pels següents components: Elèctrodes, substàncies electroquímiques actives, l'electròlit, el separador i l'empaquetat [7]. Per fer més fàcil entendre el principi de funcionament, podem veure el suport gràfic a la Figura 3-4 on s'il·lustra un exemple d'una tecnologia concreta.

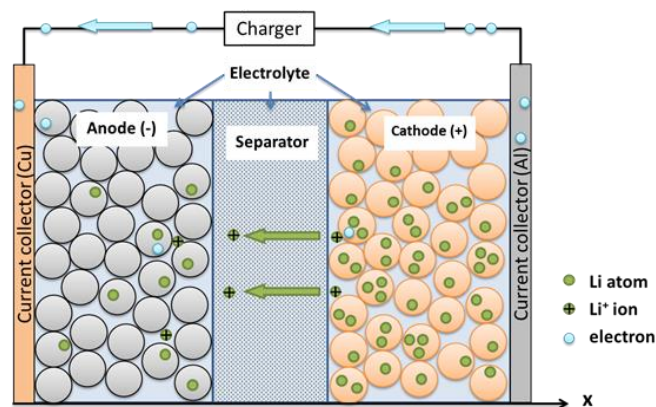


Figura 3-4: Esquema del principi de funcionament d'una bateria Li-ion [11].

Existeixen multitud de tecnologies per a la fabricació de bateries. A continuació es presenten les més rellevants.

3.3.3.1. Bateria Plom-àcid (Pb-àcid)

Des de la seva invenció a l'any 1859, per Gaston Planté, aquesta tecnologia ha evolucionat significativament i aquestes bateries resulten força econòmiques. La bateria està formada per un dipòsit d'àcid sulfúric i a l'interior d'aquest van col·locades plaques de plom paral·leles entre sí. Les plaques positives solen estar recobertes de diòxid de plom, mentre les plaques de polaritat negativa estan formades per un plom esponjós. Generalment, aquestes bateries tenen un rendiment alt que oscil·la entre el 80% i el 90% amb una bona fiabilitat. Els aspectes negatius d'aquesta tecnologia són que té un baix cicle de vida, entorn a 2000, i una baixa

densitat d'energia [8].

3.3.3.2. Bateria Níquel-Cadmi (Ni-Cd) i Níquel-Metall Hidrur (Ni-MH)

Les bateries de Ni-Cd s'utilitzen per aplicacions industrials, tant estacionàries como portàtils. Presenten bones característiques en termes de cicles de vida, superior als 3500, altes rampes de potència i la necessitat d'un baix manteniment. Tot i presentar unes bones característiques no ha tingut una bona acollida comercial degut a que supera en 10 cops els preus de les bateries Pb-àcid, el níquel i el cadmi són metalls pesant altament contaminants que poden causar riscos per la salut i és un tipus de bateria que presenta efecte memòria. Quan és recarregada repetides vegades sense que s'hagi descarregat del tot es produeix una caiguda de la tensió de la bateria [7]. Tenint en compte els riscos per la salut que presenta utilitzar aquestes bateries, la Unió Europea les està restringint per tal de reduir-ne l'ús.

Degut a les contínues restriccions aplicades sobre les bateries Ni-Cd està deixant pas a les bateries de Ni-MH, que competeix en el mateix camp de les bateries alcalines. Ni-MH presenta unes característiques de cicle de vida entorn als 500 cicles, entre un 70% i 75% d'eficiència, una ràpida resposta i una major densitat d'energia que les bateries de Ni-Cd [8].

3.3.3.3. Bateria Sulfur de Sodi (Na-S)

Les bateries de sulfur de sodi és una de les tecnologies més prometedores per aplicacions estacionàries d'alta potència. El baix pes atòmic del sodi i l'alta tensió termodinàmica configuren a les cel·les basades en sodi amb una alta potència específica. La construcció de les cel·les d'aquest tipus de bateria presenta una configuració diferent a les vistes fins ara. Els elèctrodes de les cel·les són líquid, mentre que l'electròlit, que és el separador, és sòlid. L'elèctrode negatiu (sodi líquid), està envoltat de l'electròlit (ceràmic de beta-alúmina) i el material de l'elèctrode positiu és sulfur en estat líquid. Per portar els elèctrodes a estat líquid, s'han de fondre, imposant una temperatura de funcionament en un rang de 300°C – 400°C. A aquesta temperatura, l'electròlit ceràmic és un bon conductor dels ions produïts en la reacció química [7] [10].

Aquesta tecnologia és molt atractiva per aplicacions renovables. Presenta una vida útil entorn a 2500 cicles i llargs cicles de descàrrega, ràpida resposta, alta eficiència, entorn el 85% - 90%, i alta densitat d'energia [8]. Altres característiques per la qual despunta aquesta tecnologia és per el baix manteniment que requereix i és reciclable en un 99% [7].

3.3.3.4. Bateria Liti-ió (Li-ion)

Les bateries de Li-ion estan molt esteses i són comunament utilitzades en dispositius electrònics portàtils, com poden ser ordinadors portàtils o mòbils. Aquestes bateries també són vistes com una solució prometedora en els camps de la mobilitat elèctrica o generació renovable [7] [8].

L'elèctrode positiu, el càtode de la bateria, està recobert, usualment, de cobalt de liti. Per una altra banda, l'elèctrode negatiu està format principalment de carboni i àtoms de liti. L'electròlit és una solució orgànica basada en el liti que conté sals dissoltes. I el separador sol ser un material porós basat en polietilè o polipropilè.

El potencial elèctric, entre els dos elèctrodes, d'una sola cel·la pot arribar fins als 3.7 V. Presenta una alta energia específica que ronda entre els 75 Wh/kg i els 125Wh/kg, també presenta una alta densitat d'energia que se situa entre els 170 Wh/l i els 300 Wh/l. A més, destaca una vida útil que poden arribar fins als 4500 cicles i que no presenta l'efecte memòria. Per aquestes raons està ben considerada per aplicacions portàtils com telèfons mòbils o cotxes elèctrics. Una altra característica a destacar és la velocitat de càrrega i descarrega, també destacable la seva eficiència que se situa entorn al 80% - 90%. No obstant, presenta alguns aspectes negatius, com és l'ús de substàncies inflamables que augmenta els riscos de seguretat i medi ambient. Un cas destacable va ser, en termes de seguretat, el Samsung Galaxy Note 7 que va ser prohibit a totes les aero-línies perquè les bateries explotaven i va haver de ser retirat del mercat [7] [8].

Tal i com mostra la Figura 3-5, a dia d'avui, la tecnologia Li-ion és la més indicada per donar solució a la problemàtica presentada a l'hora d'emmagatzemar altes quantitats d'energia per aplicacions industrials estacionàries i a la electromobilitat, degut a l'alta densitat d'energia que pot emmagatzemar. I és per això que s'estan fent grans esforços en el camp de la tecnologia de materials per poder adaptar aquestes bateries de Li-ion a les aplicacions citades [7] [11].

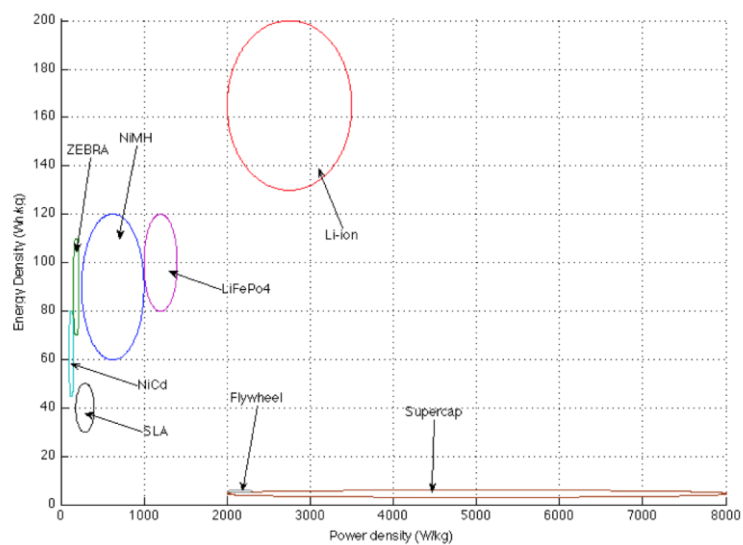


Figura 3-5: Comparativa de densitats de diferents dispositius d'emmagatzematge d'energia [11].

4. Plataforma docent

El present projecte parteix d'una plataforma docent dissenyada pel control de motors. Aquest suport docent, que porta com a nom TestBed, està formada per una etapa de potència, una de control i els motors, Brushless i de corrent continu. Aquesta plataforma va néixer de la necessitat de creació d'una eina que contingués tots els elements necessaris per facilitar la formació en la programació d'un DSP encarat al control de motors. Des de llavors, aquesta plataforma s'utilitza per la realització de cursos professionals en el control de motors també ha sigut objecte d'estudi per part d'altres estudiants a l'hora de realitzar els seus treballs finals de grau o màster.

Anteriorment s'ha explicat la necessitat de construcció d'una nova plataforma que faciliti el testeig de bateries per fer front al canvi de model energètic, que és d'on neix aquest projecte. Amb el propòsit de dissenyar i construir una nova plataforma a partir d'aquesta, prèviament s'ha de conèixer com funciona i quins elements incorpora per esgrimir si es pot aprofitar parcialment o en la seva totalitat per la implementació de la nova plataforma docent de testeig de bateries.

4.1. Elements de la plataforma

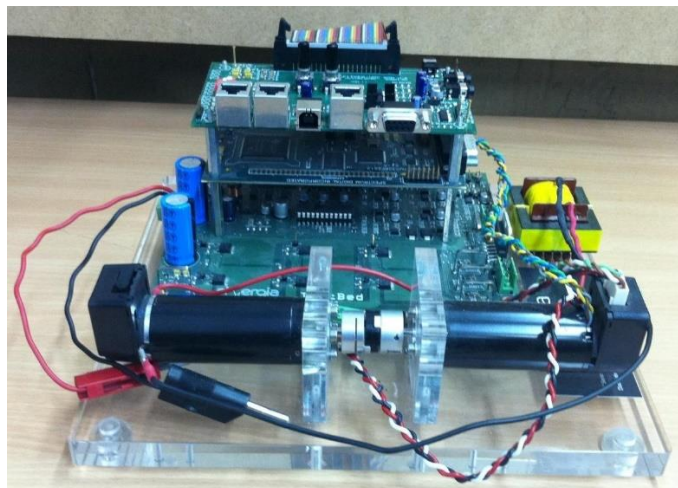


Figura 4-1: Plataforma docent pel control de motors mitjançant un DSP.

La Figura 4-1 representa la plataforma docent per al control de motors amb un DSP. Està formada per tres plaques, de dalt a baix, una placa de comunicacions auxiliar (AROM), la placa de control amb el DSP (eZdsp TMS320F2812) i l'etapa de potència (CDM2480) o TestBed. D'aquestes s'exposaran les dos últimes que són les necessàries pel control i per la potència de la nova plataforma.

4.1.1. eZdsp TMS320F2812

La targeta de control que incorpora la plataforma consta d'un DSP model TMS320F2812 de la casa Texas Instruments i diferents elements de hardware que faciliten la mesura i conversió analògic-digital i viceversa. En concret, aquesta placa forma part d'un kit d'inicialització que distribueix la companyia Spectrum Digital i es caracteritzen generalment pel seu baix cost i la facilitat que tenen d'utilització.

Aquest DSP implementa hardware de PWM, per modular les senyals que es vulguin a partir d'un cicle de treball. També dóna la sortida negada amb els temps morts, entre senyal i senyal, desitjats. De cara a transmetre informació, conté gran nombre de pins enfocats a la comunicació. Conté un connector JTAG per connectar-se a un ordinador i, per suposat, disposa d'un software dissenyat per Texas Instruments amb una interfície entenedora on es pot desenvolupar el codi per realitzar el control de motors o la nova plataforma.

4.1.2. CDM2480

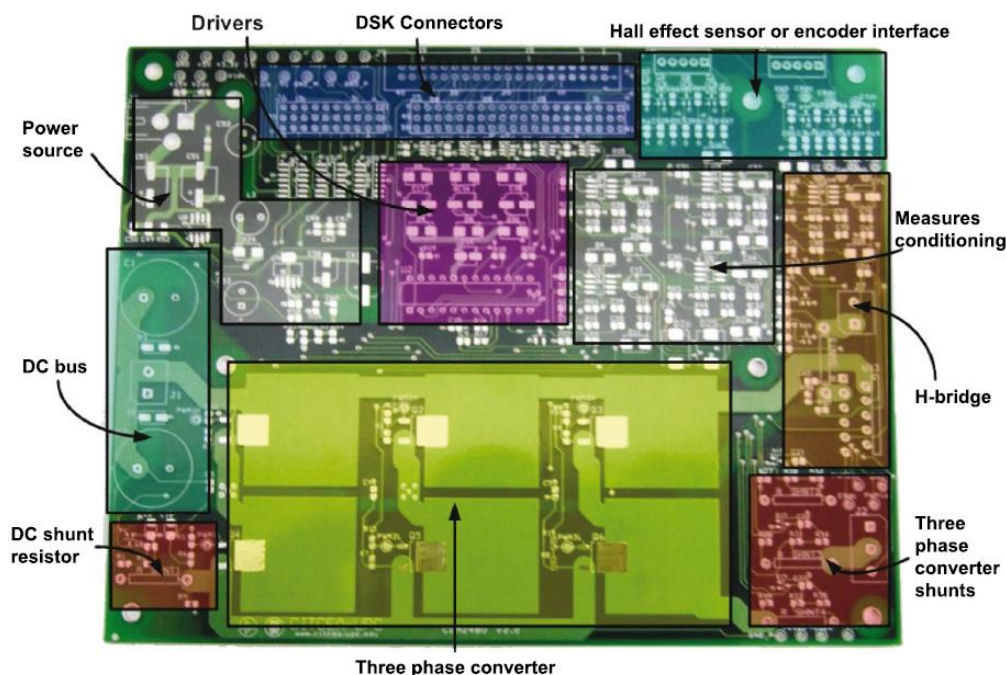


Figura 4-2: Placa de potència CDM2480 distingint les diferents parts que la conformen.

Aquesta placa, representada a la Figura 4-2, com ja s'ha exposat abans, està desenvolupada al CITCEA-UPC amb el propòsit de control de motors. Aquesta targeta, és l'encarregada de

la potència i adequar les senyals que llegirà el control DSP.

El TestBed incorpora diferents blocs com es mostra a la Figura 4-2. El primer dels blocs són els Drivers que realitzen la funció d'adequar les tensions i corrents que s'entreguen al motor a partir dels senyals que li arriben del control. Del bus de contínua penja un pont en H i un pont trifàsic complet, encarats al control del motor de corrent continu i al motor sense escombretes, respectivament.

Un bloc de mesures és el que proporciona els corrents de fase del pont trifàsic i bus de contínua mitjançant resistències de shunt. Les mesures de tensió es realitzen a través de divisors resistius amb seguidors de tensió connectats al convertidor analògic-digital.

Una altra secció del TestBed són les fonts de tensió, que s'encarreguen d'adequar les tensions per alimentar la resta de components a partir dels 5 V que rep la placa a l'entrada.

Els MOSFETS que conformen el pont trifàsic o el pont en H són interruptors controlats, així que tan importants són aquestes estructures com el hardware que proporciona el senyal perquè obrin i tanquin en els moments esperats. Aquests components, que s'anomenen *drivers*, s'encarreguen de proporcionar la tensió necessària entre porta-font del MOSFET per a que aquest obri i tanqui i compleixen també de protegir la potència del control, en aquest cas el DSP, degut a que en un costat es treballa a altes tensions i l'altre a baixes.

En la mesura del possible, la font del MOSFET és connectada a la massa del circuit per a que les tensions porta-font sempre estiguin referenciades a la massa del circuit. En estructures en que la referència de la tensió és variable acostumen a haver d'utilitzar *drivers* de control aïllats degut a que la tensió porta-font en cada instant és diferent.

4.2. Funcionament

Les plaques de control i potència, abans mencionades, estan connectades entre si a través de connectors que faciliten la comunicació entre elles. La placa de control, a la vegada, és capaç de comunicar-se amb l'ordinador a través del port paral·lel o JTAG amb un convertidor a bus sèrie. Des de l'ordinador mitjançant el programari de Texas Instruments, CodeComposer en aquest cas, es pot generar el codi desitjat per controlar els motors o els elements connectats. Tanmateix, el programa permet depurar codi i visualitzar tots els paràmetres i variables de control en temps real.

Aquestes característiques fa d'aquesta placa de control un element molt versàtil per a qualsevol propòsit de control d'accionaments o senyals de control. Pot ser tan flexible com la capacitat que demostrí l'enginyer a l'hora d'escriure l'algoritme de control.

Per aquesta raó, prèviament a continuar el treball, he realitzat el curs de control de motors de forma autodidacta per comprendre millor el funcionament del DSP i poder aprofitar millor aquesta eina quan es construeixi aquesta nova plataforma d'assaig de bateries.

5. Plataforma docent d'assaig de bateries

5.1. Introducció

Partint, doncs, de la plataforma docent per al control de motors, presentada en el Capítol 4, s'aprofitaran tots aquells elements i blocs possibles que ofereix la plataforma, i es modificaran, en última instància, d'altres, en cas que fos necessari, per tal de permetre la càrrega i descàrrega d'un conjunt de bateries.

La plataforma docent d'assaig de bateries es dissenyarà per a un model de bateries Li-ion específic.

La plataforma constarà d'una font d'alimentació, una etapa de condicionament de la potència, una etapa de filtratge que permeti obtenir el corrent desitjat per carregar la bateria i, per últim, la bateria. De forma paral·lela a la bateria es trobarà connectat un sistema dissipatiu que faciliti la descàrrega de la bateria. En el suport gràfic que hi ha a continuació, Figura 5-1, es pot veure de forma simplificada els diferents blocs que incorpora la plataforma.

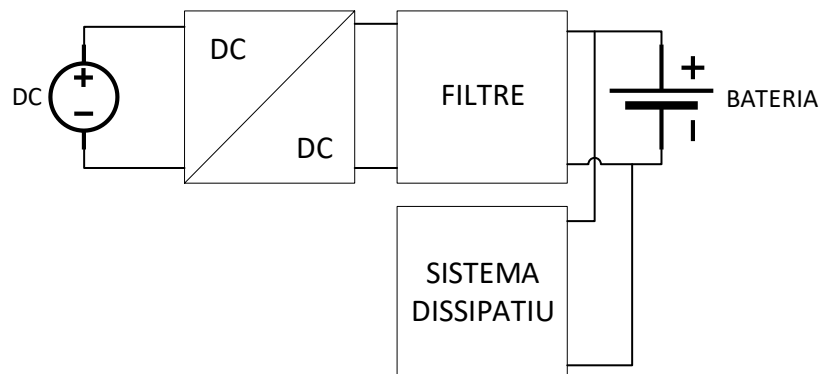


Figura 5-1: Diagrama orientatiu de la plataforma d'assaig de bateries.

5.2. Bateria Ió-Liti

La bateria seleccionada, la qual condicionarà les característiques dels sistemes de càrrega i descàrrega, és una bateria de Li-ion de la marca Samsung model ICR18650-22E.

La selecció d'aquesta bateria només es basa en la disponibilitat de múltiples cel·les d'aquest fabricant i model al CITCEA-UPC. Totes les especificacions de la bateria es poden trobar a l'Annex 1: Datasheet bateria ICR18650-22E i a la Taula 5-1, podem veure un resum de les

característiques que té la cel·la.

Taula 5-1: Taula resum de les característiques de la cel·la ICR18650-22E.

DESCRIPCIÓ	ESPECIFICACIÓ
CAPACITAT NOMINAL	2200mAh (0.2C, 2.75V descàrrega)
CAPACITAT MÍNIMA	2150mAh (0.2C, 2.75V descàrrega)
TENSIÓ DE CÀRREGA	4.2 ± 0.05 V
TENSIÓ NOMINAL	3.7 V
MÈTODE DE CÀRREGA	CC-CV (tensió constant amb corrent limitat)
CORRENT DE CÀRREGA	Càrrega estàndard: 1100 mA Càrrega ràpida: 2200 mA
TEMPS DE CÀRREGA	Càrrega estàndard: 3 h Càrrega ràpida: 2.5 hores
CORRENT MÀXIM DE CÀRREGA	2200 mA (temperatura ambient 25°C)
CORRENT NOMINAL DE DESCÀRREGA	2200 mA (temperatura ambient 25°C)
CORRENT MÀXIM DE DESCÀRREGA	4400 mA (temperatura ambient 25°C)
TENSIÓ 'CUT-OFF' DE DESCÀRREGA	2.75 V
IMPEDÀNCIA INTERNA	< 100 mΩ

Per tal d'obtenir uns valor de tensió superiors, al voltant dels 12 V, s'ha decidit formar una bateria amb tres cel·les en sèrie, així doncs els valors de tensió es veuran modificats respecte els mostrats a la taula resum, Taula 5-1.

Aquests nous valors condicionaran el disseny del filtre i del sistema dissipatiu que permetran la càrrega i descàrrega de la bateria de forma controlada. Així doncs les característiques de la bateria, formada per tres cel·les ICR18650-22E en sèrie, són els que es mostren a la Taula 5-2.

Taula 5-2: Taula resum de les característiques de la bateria composta per tres cel·les en sèrie ICR18650-22E.

DESCRIPCIÓ	ESPECIFICACIÓ
CAPACITAT NOMINAL	2200mAh (0.2C, 2.75V descàrrega)
CAPACITAT MÍNIMA	2150mAh (0.2C, 2.75V descàrrega)
TENSIÓ DE CÀRREGA	12.6 ± 0.15 V
TENSIÓ NOMINAL	11.1 V
MÈTODE DE CÀRREGA	CC-CV (tensió constant amb corrent limitat)
CORRENT DE CÀRREGA	Càrrega estàndard: 1100 mA Càrrega ràpida: 2200 mA
TEMPS DE CÀRREGA	Càrrega estàndard: 3 h Càrrega ràpida: 2.5 hores
CORRENT MÀXIM DE CÀRREGA	2200 mA (temperatura ambient 25°C)
CORRENT NOMINAL DE DESCÀRREGA	2200 mA (temperatura ambient 25°C)
CORRENT MÀXIM DE DESCÀRREGA	4400 mA (temperatura ambient 25°C)
TENSIÓ 'CUT-OFF' DE DESCÀRREGA	8.25 V
IMPEDÀNCIA INTERNA	< 300 mΩ

5.3. Metodologia de càrrega

La metodologia per carregar la bateria especificada al apartat 5.2 consisteix, tal i com estableix les característiques de la bateria a la Taula 5-1, en l'aplicació del mètode CC-CV. Corrent constant / tensió constant (de les seves sigles en anglès, CC-CV). Aquest mètode de càrrega es àmpliament utilitzat a múltiples aplicacions. La Figura 5-2 mostra l'evolució de l'estat de càrrega i tensió a la bateria mentre es realitza el mètode de càrrega esmentat.

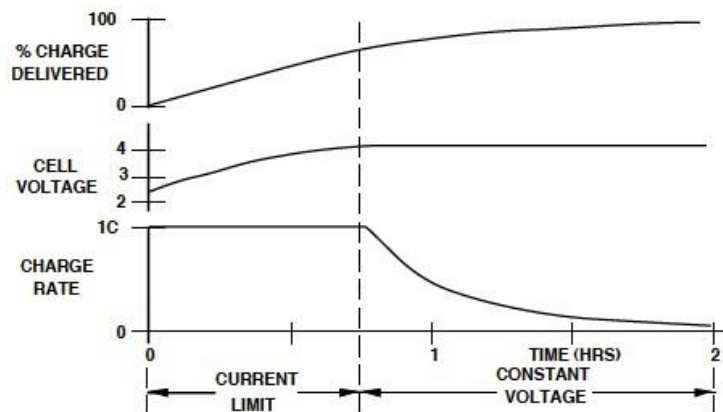


Figura 5-2: Corbes de càrrega d'una cel·la de bateria aplicant la càrrega CC-CV [12].

A diferència d'altres tecnologies, les cel·les de Li-ion requereixen un perfil de càrrega sostingut. Una bateria descarregada de ió Liti simplement no pot donar la seva tensió nominal a la sortida. D'altra banda no es pot forçar la bateria a sobrepassar la tensió límit o aplicar un corrent superior al recomanat pel fabricant. Aplicar tensions o corrents superiors a les especificades pel fabricant pot trencar les cel·les, reduir la vida útil de la bateria i afectar a la seguretat de la bateria. El repte està en maximitzar la velocitat de càrrega sense sobrecarregar les cel·les.

Per aconseguir aquest balanç, les bateries de Li-ion es carreguen en dos fases. La primera fase típicament s'anomena corrent constant (CC) o corrent límit. Es carrega la cel·la al corrent màxim permès o recomanat pel fabricant. Quan arriba a un valor especificat de tensió desitjada, típicament un valor de 4.2 V, es canvia el mètode de càrrega. El mètode de càrrega aplicat és anomenat tensió constant (CV). En aquest punt, el circuit de càrrega dóna el corrent necessari per mantenir la tensió constant al valor de tensió desitjada. Com a resultat, el corrent anirà disminuint gradualment fins que l'estat de càrrega arribi al seu màxim [12].

Es molt important seguir aquestes pautes de càrrega per evitar les sobre tensions i sobre corrents que poden provocar una ruptura interna de la cel·la i iniciar un procés que s'anomena *Thermal runaway*. Aquest procés succeeix usualment en el procés de càrrega, la temperatura de la bateria s'eleva ràpidament fins el punt de fondre el liti metàl·lic i causa reaccions violentes. Aquestes reaccions poden afectar a la cel·la del costat i començar una reacció en cadena[17].

5.4. Convertidor estàtic: Pont H

El propòsit del convertidor estàtic és el de moderar la tensió mitja a la sortida d'aquest per aconseguir els nivells de tensió requerits per la càrrega de la bateria. S'ha seleccionat aquesta topologia perquè el TestBed incorpora un pont trifàsic complet que es pot adaptar fàcilment per la implementació d'aquest projecte. No obstant, és una estructura que és molt adequada per aquest propòsit. Amb un pont H podem aconseguir tensions mitjanes de sortida baixes, molt adient si es volguessin testear cel·les per separat en un futur o testear cel·les d'altres tecnologies amb tensions de 1,2 V per cel·la, com són les bateries de Ni-Cd.

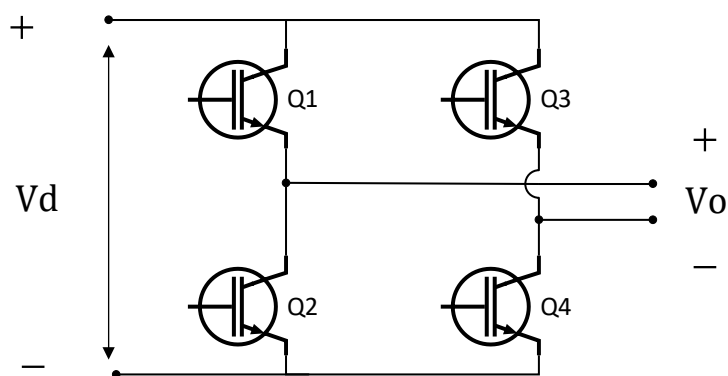


Figura 5-3: Topologia del convertidor estàtic: Pont H.

El principi de funcionament d'aquest convertidor estàtic varia en funció de la metodologia de modulació escollida. En aquest cas s'utilitzarà la modulació PWM unipolar (UPWM, de les seves sigles en anglès) en comptes de la PWM bipolar per les raons que s'exposen a continuació.

La modulació bipolar (BPWM, de les seves sigles en anglès), els interruptors superiors i inferiors d'una mateixa branca del pont funcionen de forma complementaria amb un interruptor obert i l'altre tancat. Per tant, només hi ha dues senyals de porta independents que es generen comparant la V_{tri} amb la V_{ref} . Les tensions bornes del pont s'obtenen $V_0 = V_{AN} - V_{BN}$. Atenen que la forma d'ona V_{AB} varia entre les tensions negatives i positives, per generar qualsevol tensió mitja, considerem aquesta tècnica de commutació PWM bipolar.

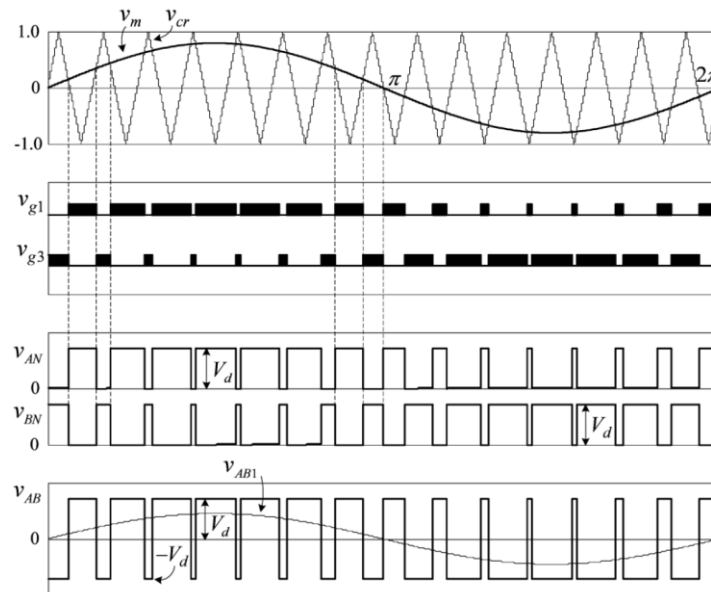


Figura 5-4: Modulació PWM utilitzant una ona triangular portadora [13].

Per una altra banda, la modulació UPWM té una ona portadora, V_{tri} , que varia normalment entre -1 V i $+1\text{ V}$, dues tensions de referència, V_{ref} , la segona desfasada 180° respecte la primera, que adopten valors compresos entre el màxim i mínim de V_{tri} . A partir de la comparació de les senyals V_{tri} i $\pm V_{ref}$ es generen dues senyals de porta diferents, que són les dels interruptors superiors de cada branca. A diferència de la modulació PWM les branques són independents, no canvien el seu estat a la vegada. La sortida en bornes del convertidor ve donat per $V_0 = V_{AN} - V_{BN}$, però a l'hora de generar tensions mitjanes positives el pont ho fa amb tensions que oscil·len des de 0 fins a $+V_d$, i entre 0 i $-V_d$ quan es generen tensions mitjanes negatives. Aquest tipus de modulació redueix les pèrdues i genera menys quantitat d'interferències electromagnètiques [13].

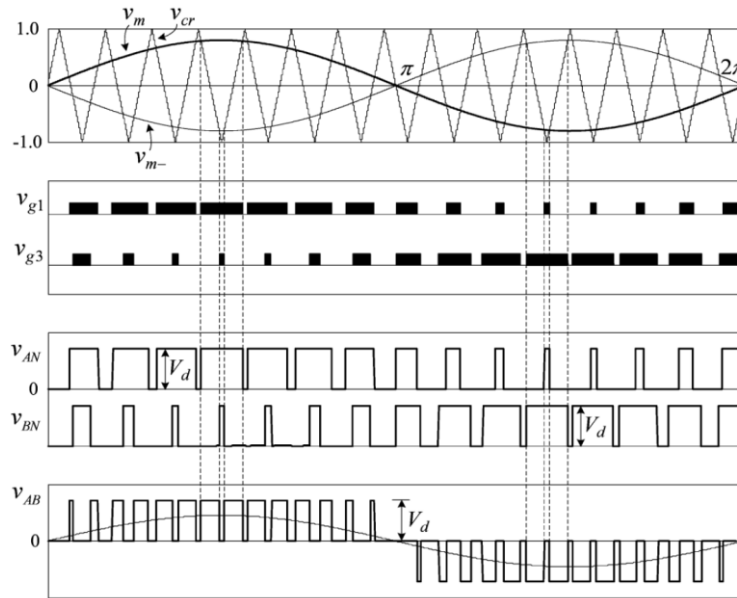


Figura 5-5: Modulació UPWM utilitzant una ona triangular portadora [13].

Com es dedueix de les explicacions de funcionament de la modulació BPWM i UPWM, aquesta última comporta més beneficis que la primera. No obstant, el principal factor és que no interessa que es generin tensions negatives tot i que la tensió mitjana generada sigui positiva.

Justificat l'elecció de la tècnica de modulació, s'exposa com influeix en el pont en H aquesta tècnica.

La ona V_{tri} es compara amb la tensió de control, o de referència, V_{ref} , i controla la branca de transistors Q1 i Q2. L'altra branca és controlada comparant la ona triangular amb $-V_{ref}$ [13].

$$Q1\ ON \rightarrow V_{ref} > V_{tri} \quad (5-1)$$

$$Q2\ ON \rightarrow -V_{ref} > V_{tri} \quad (5-2)$$

El cicle de treball pel transistor Q1 i Q4 és proporcional al temps en que el transistor està treballant, per tant:

$$D1 = \frac{t_{ON}}{T} \quad (5-3)$$

El cicle de treball pels transistors Q2 i Q3 és el complementari a D1 (5-3). Així doncs:

$$D3 = 1 - D1 \quad (5-4)$$

La tensió mitja V_0 pot ser expressada amb la següent expressió analítica:

$$V_0 = V_d \cdot (2 \cdot D1 - 1) \quad (5-5)$$

Tenint en compte l'expressió anterior (5-5), per $D1 = 0$, $V_0 = -V_d$; per $D1 = 0,5$, $V_0 = 0$; i per $D1 = 1$, $V_0 = V_d$. Per tant, per utilitzar una tensió unipolar el cicle de treball $D1$, només s'ha de variar entre 0,5 i 1 [7].

El *duty-cycle* o cicle de treball del convertidor també es pot determinar a partir de l'expressió (5-5)

$$D1 = \frac{\left(\frac{V_0}{V_d} + 1\right)}{2} = \frac{V_0 + V_d}{2V_d} \quad (5-6)$$

5.5. Filtre LC

A la sortida del convertidor és on la bateria ha de ser connectada per carregar i descarregar. Per assegurar un procés de carrega fluid, amb arrissades de corrent i tensió petites s'ha d'incloure un filtre LC entre el convertidor i la bateria, com representa la Figura 5-6.

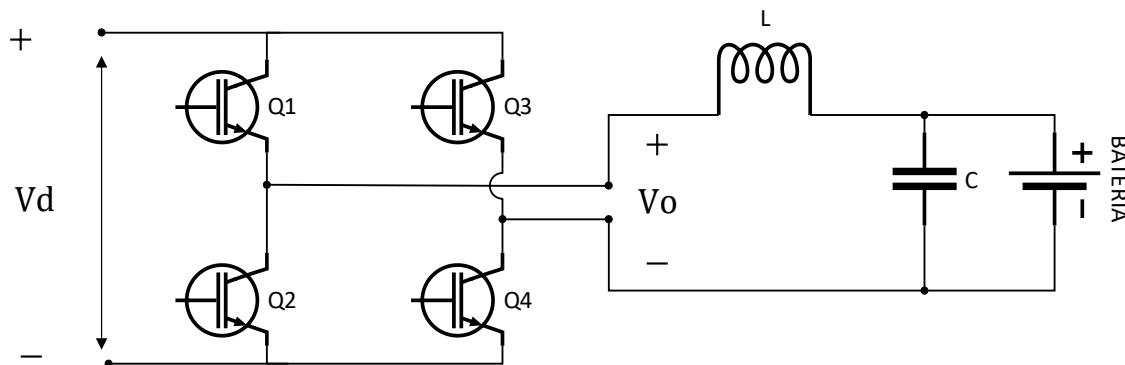


Figura 5-6: Topologia del pont H amb el filtre LC a la sortida del convertidor amb la bateria.

En termes generals, com més gran sigui el filtre, més baixes seran les arrissades de corrent i tensió a la sortida del filtre però incrementarà el cost dels seus components. Per reduir aquest cost es pot augmentar la freqüència de commutació però llavors es produeixen unes majors pèrdues per la commutació dels transistors. Així doncs, s'ha de trobar un equilibri entre tamany, cost i pèrdues.

5.5.1. Condicions de disseny del filtre

Existeixen una sèrie de paràmetres que s'escullen, en aquest cas, a criteri de l'enginyer. Paràmetres com la freqüència de commutació, nivells d'arissat o tensió d'alimentació. Aquest apartat fixa aquests valors a la Taula 5-3.

Taula 5-3: Condicions de disseny del filtre.

Freqüència de commutació, f_c [kHz]	10
Arissat de corrent, ΔI_L [mA]	5%·Corrent de càrrega (estàndard)
Tensió d'alimentació del convertidor, V_d [V]	24

5.5.2. Càlcul de filtre

La modulació UPWM té la característica que a la sortida veu dos vegades la freqüència de commutació dels interruptors. Això és degut que en un cicle de la ona portadora es produeixen dos cicles de commutació. Així doncs tot i haver fixat una freqüència de commutació de 10 kHz els càlculs que es presenten a continuació es realitzaran amb $f_c = 20$ kHz que es la freqüència que veu el filtre.

L'expressió analítica que determina l'arissada de corrent es pot expressar com [14]:

$$\Delta I_L = \frac{V_0}{L \cdot f_c} \quad (5-7)$$

Operant les expressions (5-3), (5-5), (5-7) i la relació període-freqüència, obtenim la relació següent:

$$\Delta I_L = \frac{V_D \cdot (2 \cdot t_{ON} \cdot f_c - 1)}{L \cdot f_c} \quad (5-8)$$

A partir de la darrera expressió analítica s'obtindrà el valor de la inductància per al filtre. Prèviament s'ha de determinar el punt de treball on s'assoleix la tensió màxima de sortida del convertidor, punt on l'arissada serà màxima.

La tensió màxima que pot veure la bateria durant la càrrega, tal i com mostra la Taula 5-2, és de 12,6 V. I la tensió mínima de tall o *cut-off* és de 8,25 V. Determinem el cicle de treball a partir de l'expressió analítica (5-6). I el valor de temps de treball t_{on} a partir de (5-3)

$$D1|_{V_0=12,6} = \frac{12,6 + 24}{2 \cdot 24} = 0,7625 \quad (5-9)$$

$$D1|_{V_0=8,25} = \frac{8,25 + 24}{2 \cdot 24} = 0,6719 \quad (5-10)$$

El valor de t_{on} és proporcional al valor del cicle de treball. El valor més crític s'obté quan el convertidor generi una tensió mitja de sortida de 12,6 V amb un *duty-cycle* de 0,7625. Per lo tant, el valor de t_{on} serà:

$$t_{ON} = D1 \cdot T = D1 \cdot \frac{1}{f_c} = 0,7625 \cdot \frac{1}{20 \cdot 10^3} = 38,125 \mu s \quad (5-11)$$

Tal com s'ha explicat a l'apartat 5.5.1 l'arissada de corrent serà d'un 5% del corrent de càrrega (estàndard). Utilitzant la següent expressió analítica obtenim el valor de l'arissada.

$$\Delta I_L = I_{Lmax} - I_{Lmin} = 1,05 \cdot I_{bat} - 0,95 \cdot I_{bat} = 1,1 \cdot (1,05 - 0,95) = 0,11 A \quad (5-12)$$

Un cop calculats aquests paràmetres i utilitzant l'equació (5-8) podem arribar a la conclusió que es necessita una inductància de 5,72 mH.

$$L = \frac{V_D \cdot (2D - 1)}{\Delta I_L \cdot f_c} = \frac{24 \cdot (2 \cdot 0,7625 - 1)}{0,11 \cdot 20 \cdot 10^3} = 5,72 \text{ mH} \quad (5-13)$$

Comercialment, el valor estàndard superior més pròxim al resultat obtingut és 6 mH.

Una vegada calculat el valor de la inductància, es troba el valor del condensador, ja que aquest depèn del primer valor calculat. L'expressió analítica que ens permet calcular el condensador del filtre ve donat per la següent expressió [14]:

$$\Delta V_C = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{1}{C} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta I_L}{2} \cdot \frac{T}{2} = \frac{V_D \cdot (2 \cdot t_{ON} \cdot f_c - 1)}{8 \cdot C \cdot L \cdot f_c^2} \quad (5-14)$$

De l'equació anterior, només resta calcular el valor de l'arissat de tensió per estimar el valor de la capacitat del condensador. De la fórmula de l'arissat de tensió s'obté:

$$\Delta V_C = \Delta I_L \cdot Z_{bat} = 0,11 \cdot 300 \cdot 10^{-3} = 0,033 V \quad (5-15)$$

A partir de l'equació (5-14) i utilitzant el valor comercial trobat per la inductància, es pot calcular el valor de la capacitat del condensador.

$$C = \frac{24 \cdot (2 \cdot 38,125 \cdot 10^{-6} \cdot 20 \cdot 10^3 - 1)}{8 \cdot 0,033 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot (20 \cdot 10^3)^2} = 19,88 \mu F \quad (5-16)$$

Comercialment el valor més adient és de 20 μF a la sèrie E24.

5.6. Element dissipatiu

Un cop estimats els components necessaris pel procés de càrrega de la bateria resta calcular els components pel procés de descàrrega. Existeixen dos opcions per realitzar el procés de descàrrega. La primera és generar una tensió mitja negativa a la sortida del convertidor per fer circular el corrent en sentit contrari al de la càrrega de la bateria. La segona és col·locar una resistència amb un interruptor controlat en paral·lel amb la bateria per dissipar tota l'energia que emmagatzema.

L'etapa de potència del TestBed, presentat en el capítol 4, està alimentada per una font de 24 V DC unidireccional, en aquest sentit, la primera opció plantejada per completar el cicle de descàrrega no es podria dur a terme ja que seria necessària una font bidireccional.

D'aquesta manera, la solució serà dissipar l'energia de la bateria a través del sistema dissipatiu que queda representat en la Figura 5-7.

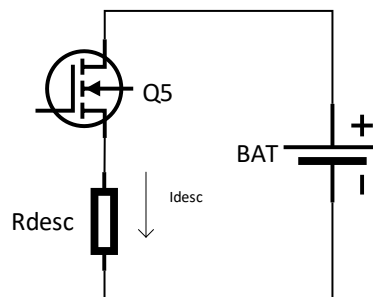


Figura 5-7: Topologia del sistema de descàrrega.

5.6.1. Càlcul de la resistència

Conegut el valor del corrent màxim de descàrrega i la tensió màxima que la bateria assoleix, donada a la Taula 5-2, aplicant la Llei d'Ohm podem estimar el valor de la resistència necessària.

Tot i que la descàrrega de la bateria pot ser controlada a través d'un interruptor controlat, per evitar que es cremi la resistència s'aplicarà per un factor de seguretat, f_{seg} , d'un 20%.

$$R = \frac{U_{max} \cdot f_{seg}}{I_{max}} = \frac{12,6 \cdot 1,2}{4,4} = 3,43 \, \Omega \quad (5-17)$$

$$P_{max} = I_{max} \cdot U_{max} \cdot f_{seg} = 4,4 \cdot 12,6 \cdot 1,2 = 66,5 \, \text{W} \quad (5-18)$$

En el moment que es seleccioni el component dissipatiu haurà de complir les condicions prèvies de resistivitat i potència donades a (5-17) i (5-18), respectivament.

5.6.2. Interruptor controlat

Amb l'objectiu de controlar el ritme de descàrrega de la bateria, tal i com es mostra a la Figura 5-7, es col·locarà un interruptor controlat, com pot ser un MOSFET, amb l'objectiu de mantenir obert l'interruptor durant el procés de càrrega i disposar de la capacitat de trossejar la tensió en el procés de descàrrega per controlar el ritme en que es descarrega la bateria.

Les especificacions mínimes que ha de reunir aquest MOSFET són

$$I_{DC} = I_{\max} \cdot f_{seg} = 4,4 \cdot 2 = 8,8 \text{ A} \quad (5-19)$$

$$V_{DS} = U_{\max} \cdot f_{seg} = 12,6 \cdot 2 = 25,2 \text{ V} \quad (5-20)$$

On I_{\max} és el corrent màxim de descàrrega, U_{\max} és la tensió màxima de la bateria i f_{seg} és un factor de seguretat.

5.7. Control

Aquest apartat 5.7 està basat en el llibre [7], capítol 6.4: *'The Modeling and Control of Storage-Side Converters and Storage Containers'*.

La tensió en els terminals de la cel·la està afectada per diferents no-linearitats dins de la cel·la. És per això que per dissenyar un controlador és important caracteritzar la planta del sistema a controlar, en aquest cas la bateria, per una planta equivalent que permeti calcular la tensió de la cel·la a partir del corrent. No obstant, aquesta tasca es mostra molt complexa degut a les no-linearitats esmentades.

Una aproximació al comportament de la cel·la mentre es troba en la zona nominal de funcionament és un supercondensador. Dins de la zona nominal d'operació, la caiguda de tensió nominal mentre es descarrega va des de u_0 fins u_T , en un procés que dura T segons. Considerant que la bateria es descarrega a un corrent constant donat, podem estimar l'energia entregada per la bateria, E_{bat} .

$$E_{bat} = \frac{1}{2} \cdot i \cdot T(u_0 + u_T) \quad (5-21)$$

Comparant la tensió de la cel·la a un supercondensador, on la tensió també va des de u_0 fins u_T mentre es descarrega, l'energia alliberada en aquest procés pot ser calculada com:

$$E_{cap} = \frac{1}{2} \cdot C (u_0^2 - u_T^2) \quad (5-22)$$

Igalant les equacions (5-21) i (5-22), la capacitat C equivalent és:

$$C = \frac{i \cdot T(u_0 + u_T)}{(u_0^2 - u_T^2)} \quad (5-23)$$

La dinàmica del condensador de tensió es molt més lenta que la dinàmica de l'inductor de corrent. Això indica la necessitat de dissenyar un control en cascada, el qual presenti un llaç interior de control ràpid per al inductor de corrent que rebrà les consignes dels valors desitjats, *setpoints*, per part de la sortida del llaç de control exterior que pertany al condensador de tensió. La Figura 5-8 representa el sistema de control proposat per a la gestió de la càrrega de la bateria [7].

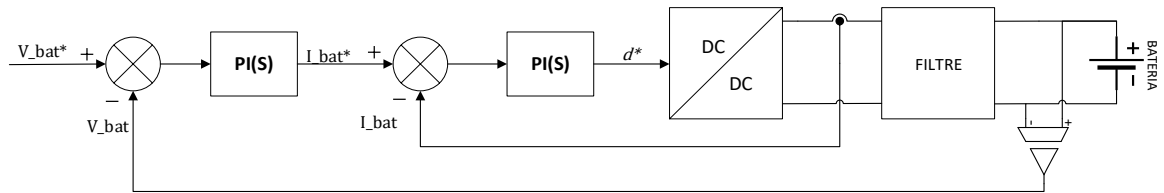


Figura 5-8: Sistema de control en cascada per la gestió de càrrega de una bateria Li-ion.

5.7.1. Llaç de control de corrent

El disseny del control del llaç de corrent està basat en l'equació (5-24), on u_t és la tensió després del inductor.

$$L \cdot \frac{di}{dt} + u_t = V_0 \quad (5-24)$$

Transformant al domini de Laplace obtenim la funció de transferència pel control de corrent de l'inductor. Considerant el control PI, la funció de transferència del llaç de control de corrent tancat pot expressar-se com:

$$\frac{I(s)}{I^*(s)} = \frac{C_i(s)G_i(s)}{1 + C_i(s)G_i(s)} = \frac{\left(K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s}\right)\left(\frac{V_d}{L_s}\right)}{1 + \left(K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s}\right)\left(\frac{V_d}{L_s}\right)} \quad (5-25)$$

On K_{pi} i K_{ii} són els paràmetres del control PI.

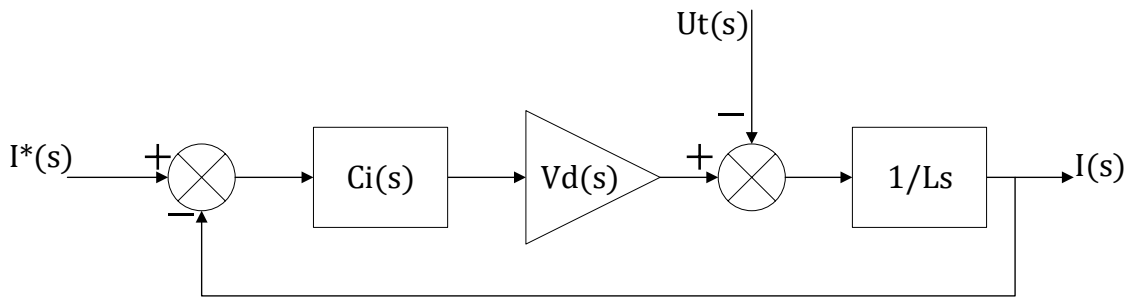


Figura 5-9: Control de corrent del inductor.

Treballant l'expressió (5-25) es pot expressar com:

$$\frac{I(s)}{I^*(s)} = \frac{\frac{K_{pi}V_d}{L}s + \frac{K_{ii}V_d}{L}}{s^2 + \frac{K_{pi}V_d}{L}s + \frac{K_{ii}V_d}{L}} = \frac{2\xi_i\omega_i s + \omega_i^2}{s^2 + 2\xi_i\omega_i s + \omega_i^2} \quad (5-26)$$

On els paràmetres de control K_{pi} i K_{ii} es poden expressar com

$$K_{pi} = \frac{2\xi_i\omega_i L}{V_d} \quad (5-27)$$

$$K_{ii} = \frac{\omega_i^2 L}{V_d} \quad (5-28)$$

El control dels paràmetres K_{pi} i K_{ii} depèn en dos graus de llibertat, ξ_i i ω_i , que han de ser determinats per l'enginyer que dissenyi el control [7].

5.7.2. Llaç de control de tensió

El disseny del llaç de control de tensió es pot aproximar mitjançant l'equació (5-29).

$$C \frac{du_t}{dt} = i \quad (5-29)$$

Transformant al domini de Laplace obtenim la funció de transferència pel control de tensió en bornes de la bateria, que recordem que es modelitza com un supercondensador. Considerant el control PI, la funció de transferència del llaç tancat de control de tensió pot expressar-se com:

$$\frac{U_t(s)}{U_t^*(s)} = \frac{C_{uc}(s)G_{uc}(s)}{1 + C_{uc}(s)G_{uc}(s)} = \frac{\left(K_{pu} + \frac{K_{iu}}{s}\right)\left(\frac{1}{Cs}\right)}{1 + \left(K_{pu} + \frac{K_{iu}}{s}\right)\left(\frac{1}{Cs}\right)} \quad (5-30)$$

On K_{pu} i K_{iu} són els paràmetres del control PI.

Treballant l'expressió anterior, es pot expressar com:

$$\frac{U_t(s)}{U_t^*(s)} = \frac{\frac{K_{pu}}{C}s + \frac{K_{pu}}{C}}{s^2 + \frac{K_{pu}}{C}s + \frac{K_{pu}}{C}} = \frac{2\xi_u\omega_u s + \omega_u^2}{s^2 + 2\xi_u\omega_u s + \omega_u^2} \quad (5-31)$$

On els paràmetres de control, pel llaç de control de tensió, K_{pu} i K_{iu} es poden formular com:

$$K_{pu} = 2\xi_u\omega_u C \quad (5-32)$$

$$K_{iu} = \omega_u^2 C \quad (5-33)$$

D'igual manera que en el control del llaç de corrent, el control dels paràmetres K_{pu} i K_{iu} depèn en dos graus de llibertat, ξ_u i ω_u , que han de ser determinats per l'enginyer que dissenyi el control [7].

5.7.3. Càlcul dels paràmetres de control del procés de càrrega

Com s'ha explicat en els apartats anteriors, 5.7.1 i 5.7.2, hi ha dos paràmetres en els llaços de control que se seleccionen a criteri del dissenyador. A continuació es tractarà d'explicar com afecten aquests paràmetres i justificar els valors escollits.

5.7.3.1. Factor d'amortiment

La forma estàndard d'un sistema de segon grau té la següent forma:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5-34)$$

On ω_n és la freqüència natural no amortida i ξ és el factor d'amortiment.

Quan s'analitza la resposta de la planta per una entrada esglaó unitari, trobem que en funció del valor del factor d'amortiment la resposta pren diferents comportaments tal i representa la Figura 5-10. Per valors $0 < \xi < 1$ es considera que la resposta és sub-amortida. $\xi = 1$ és críticament amortida i $\xi > 1$, sobre-amortida.

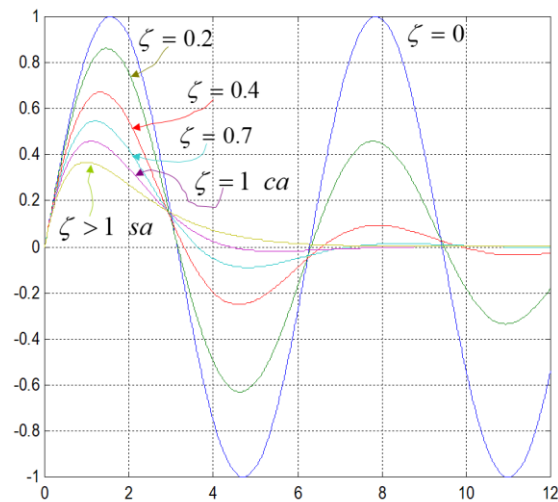


Figura 5-10: Resposta per una entrada esglaió d'un sistema de segon grau per a diferents valors de ξ .

Davant la semblança del sistema estudiat en aquest projecte al d'un sistema estàndard de segon grau, es pot afirmar que el factor d'amortiment afectarà de forma similar en aquest sistema. Per aquest motiu s'escollirà un valor de $\xi = 1$, per obtenir una resposta críticament amortida en ambdós llaços de control.

5.7.3.2. Freqüència natural no amortida

La freqüència natural no amortida correspon a la velocitat, unitats en $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$, que oscil·larà el sistema si no existís l'amortiment.

En el llaç de control de corrent ens trobem que es busca una resposta ràpida, de l'ordre de 10 mil·lisegons (ms), aproximadament. Tenint en compte la relació

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot \frac{1}{T} \quad (5-35)$$

Per $\omega_i = 600 \left(\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right)$ el sistema treballa amb una resposta de ≈ 10 ms.

D'altra banda, per al llaç de control de tensió es busca una resposta lenta, de l'ordre de segons. Aplicant la mateixa relació que en el cas anterior, expressada en (5-35)

Per $\omega_u = 6 \left(\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right)$ el sistema treballa amb una resposta de ≈ 1 s.

5.7.3.3. Paràmetres controlador PI

En els apartats 5.7.1 i 5.7.2 argumenta com extreure les equacions que defineixen el comportament de la planta i obtenir les expressions analítiques que permeten sintonitzar els controladors PI del llaç de corrent i tensió a través de les equacions (5-27), (5-28), (5-32) i (5-33).

$$K_{pi} = \frac{2\xi_i \omega_i L}{V_d} = \frac{2 \cdot 1 \cdot 600 \cdot 6 \cdot 10^{-3}}{24} = 0,3 \quad (5-36)$$

$$K_{ii} = \frac{\omega_i^2 L}{V_d} = \frac{600^2 \cdot 6 \cdot 10^{-3}}{24} = 90 \quad (5-37)$$

Abans de calcular els paràmetres per sintonitzar PI del llaç de tensió, cal calcular el valor equivalent de capacitat per a la bateria, recordant que en el model s'aproxima al comportament d'un supercondensador aproximat per l'equació (5-23).

$$C = \frac{i \cdot T(u_0 + u_T)}{(u_0^2 - u_T^2)} = \frac{2,2 \cdot 3600 \cdot (11,4 + 11,1)}{(11,4^2 - 11,1^2)} = 26400 \text{ F} \quad (5-38)$$

On i és el corrent de descàrrega nominal (A), T és el temps de descàrrega (s), u_0 és la tensió on comença la zona lineal de descàrrega fins arribar a u_T (valor nominal), en (V). Els valors de T , u_T i u_0 són aproximats degut a que el *datasheet* de la cel·la no ofereix les dades o corbes necessàries per poder modelar el comportament de la bateria.

Per tant, els valors que sintonitzen el PI del llaç de tensió són:

$$K_{pu} = 2\xi_u \omega_u C = 2 \cdot 1 \cdot 6 \cdot 26400 = 3,1680 \cdot 10^5 \quad (5-39)$$

$$K_{iu} = \omega_u^2 C = 6^2 \cdot 26400 = 9,5040 \cdot 10^5 \quad (5-40)$$

5.7.4. Control de descàrrega

Aquest control no necessita ser tan precís com l'anterior, ja que el propòsit és dissipar tota l'energia de la bateria a través d'una resistència de potència. És per això que el seu control serà a llaç obert.

En tot moment es pot conèixer el corrent que circula per la resistència amb cert grau d'error mitjançant la llei d'Ohm al sistema proposat a la Figura 5-7.

$$I_{desc} = \frac{U_{bat}}{R_{desc}} \quad (5-41)$$

On R_{desc} és una dada coneguda, U_{bat} és un paràmetre de la bateria a controlar i I_{desc} és el corrent que circula a través de la resistència.

S'estima que el valor $I_{desc} \cong I_{bat}$. El corrent que proporciona la bateria és I_{bat} .

La tensió U_{bat} es pot controlar modulant l'ample del pols (PWM, de les seves sigles en anglès) que controla l'interruptor. La tensió en bornes de la resistència queda definida per

$$V_R = U_{bat} \cdot D_{desc} \quad (5-42)$$

On V_R és la tensió en bornes de la resistència i D_{desc} és el cicle de treball on $0 \leq D_{desc} \leq 1$.

5.8. Sistema de gestió de la bateria

El sistema de gestió de la bateria (BMS, de les seves sigles en anglès) és el sistema encarregat d'obtenir informació en relació amb l'estat de la bateria. Monitoritza l'estat de càrrega, el control per assegurar un bon funcionament durant la vida útil de la bateria, equipa sensors de temperatura i tensió i pot gestionar l'electrònica encarregada del procés de càrrega i descàrrega. Controlant aquests aspectes entre altres, el BMS és de gran importància en quant a la vida útil de la bateria [7].

En el BMS, una de les seves funcions principals és estimar l'estat de càrrega (SoC, de les seves sigles en anglès). Existeixen diferents mètodes per estimar l'estat de càrrega, per aquest projecte s'utilitzarà el mètode conegut com a "*Coulomb counting*", un dels mètodes més utilitzats i alhora més fàcils d'implementar. Es basa en mesurar el corrent d'entrada i sortida durant el període de temps, partint de la base que la capacitat total de la bateria és coneguda. No obstant, és un mètode que no és perfecte degut a les pèrdues i que normalment l'estimació es troba per sobre del valor real. Aquest mètode funciona especialment bé amb les bateries Li-ion. S'estan realitzant millores en aquest mètode tenint en compte el cicle de vida de la bateria i la temperatura per obtenir estimacions més acurades [15].

A la pràctica, aquest recompte de coulombs es fa integrant el corrent en el temps [16]

$$SoC_t = SoC_0 + \frac{1}{C} \cdot \int_0^t i(t) \cdot dt \quad (5-43)$$

$$SoC_t = SoC_0 - \frac{1}{C} \cdot \int_0^t i(t) \cdot dt \quad (5-44)$$

On SoC_0 és el valor inicial de la càrrega (5-43) o descàrrega (5-44) i és un valor conegut, SoC_t és el valor de l'estimació del estat de càrrega, C és la capacitat en A·s i $i(t)$ és el corrent que hi circula per la bateria.

5.9. Proposta de la solució

Havent explicat, en els apartats anteriors, les solucions per als diferents apartats de càrrega, descàrrega i control per a cada una de les accions, en aquest apartat es presenta la solució en conjunt a la Figura 5-11.

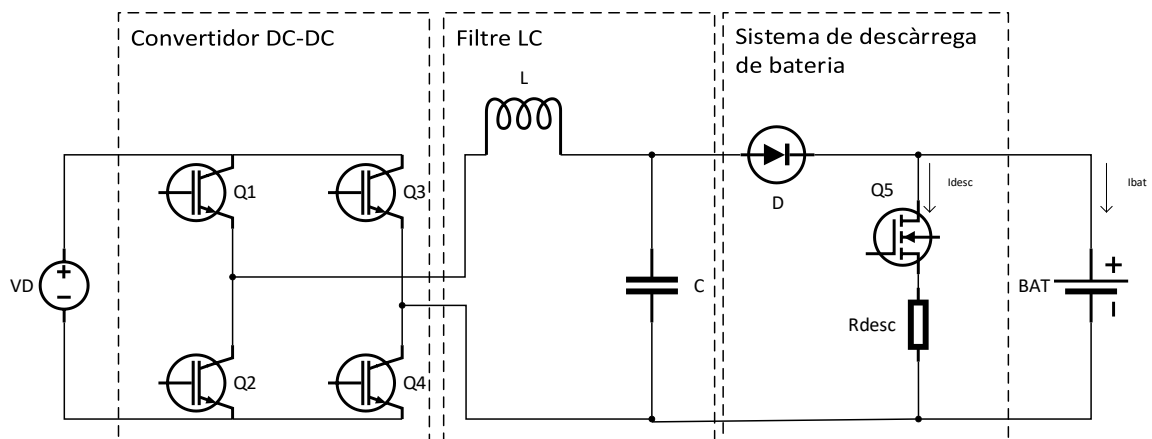


Figura 5-11: Topologia de la proposta de solució

Entre el sistema de càrrega i descàrrega s'ha optat per incorporar un díode per evitar que en el moment de la descàrrega de la bateria flueixi corrent en sentit contrari al desitjat, en direcció al pont en H. Durant la càrrega de la bateria l'interruptor Q5 s'haurà de trobar totalment obert, ja que aquest dissiparia tot el corrent que es voldria injectar a la bateria.

Les portes dels interruptors aniran connectades al controls de l'excitació que s'encarregaran d'obrir i tancar el pas de corrent i aquests es gestionaran segons els PI prèviament estudiats i calculats a l'apartat 5.7.

5.10. Simulació

En aquest apartat es realitza una simulació mitjançant el software Simulink de Matlab amb el qual es pretén validar la proposta feta a l'apartat anterior. Es comprovarà que els valors d'arribat coincideixen amb els desitjats, que els paràmetres de control responen amb la rapidesa necessària, entre altres aspectes.

S'ha escollit aquest software per la disposició d'un element de bateria simulable en aspectes

de càrrega i descàrrega, ja que en altres softwares es considera una font de tensió fixa. Aquest element es trobava en altres softwares de simulació de sistemes d'electrònica de potència però només disponibles en la versió professional. Aquesta es la raó principal per la qual s'ha optat per l'ús de Simulink, a més de la seva versatilitat.

S'han realitzat simulacions amb esquemes diferents per poder trobar els resultats més acurats en funció del temps de simulació. A continuació es presenten les simulacions realitzades i els valors obtinguts utilitzant en tot moment les condicions calculades i explicitades en els apartats anteriors per al filtre, control i metodologia de commutació. No obstant, es pot trobar el recull dels paràmetres utilitzats a les simulacions a l'Annex 2: Paràmetres de simulació.

5.10.1. Simulació amb el pont en H

En aquesta primera simulació s'ha utilitzat l'esquema proposat a l'apartat 5.9 sense el sistema de descàrrega, tal i com es pot veure a la Figura 5-12.

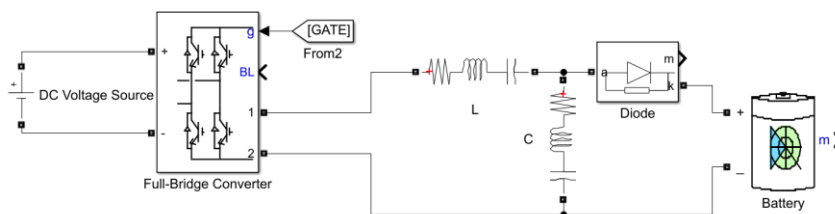


Figura 5-12: Esquema de simulació sense els elements de mesura i control.

Aquesta simulació pretén trobar els valor d'arissada de corrent, veure si la sintonització dels PI és correcta, els polsos generats a les portes del interruptors i el PWM tenint en compte totes les variacions de tensió que es produeixen degut a les commutacions que realitza el pont en H en una finestra de temps de pocs mil·lisegons.

5.10.1.1. Configuració del model

El model simulat és el presentat a la Figura 5-13. Els paràmetres que presenta el model són els raonats al llarg del treball i compta amb nombroses sortides de visualització de senyals per corroborar el seu funcionament.

desitjada, l'arissada serà:

$$\Delta I_L = 0,98 - 0,93 = 0,05 \text{ A} \quad (5-46)$$

Aquesta arissada de corrent està per sota de l'estimat. En el procés de calcular aquests valors només s'ha tingut en compte la inductància i no tot el conjunt del sistema. El càlcul de la inductància ha seguit un criteri conservador però, observant la simulació seria possible disminuir el valor d'aquesta inductància si el valor de l'arissada al transitori no suposa cap problema.

En aquests primers instants es pot apreciar el funcionament del PWM i el seu senyal de sortida tal i com representa la Figura 5-15. La tensió de referència ve donada pel controlador PI. A partir d'aquest senyal de PWM es generen els senyals de porta que obren i tanquen els interruptors que generen la tensió de sortida del convertidor que es pot observar en aquesta Figura 5-15.

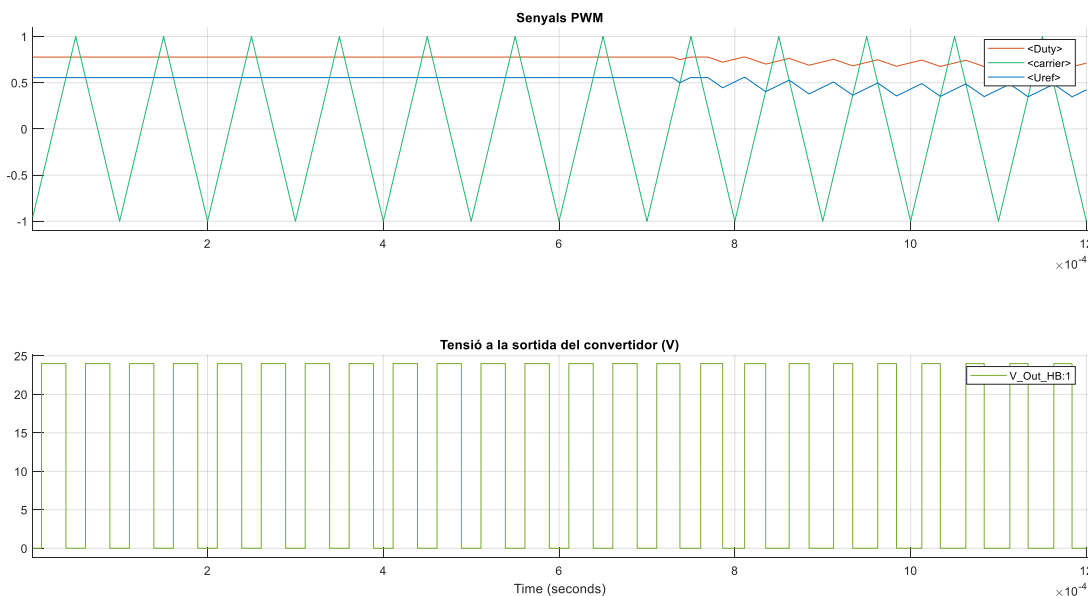


Figura 5-15: Senyals PWM.

Les senyals de porta que generen aquesta tensió de sortida queden representades a la Figura 5-16. Tal com s'ha mencionat en apartats anteriors, utilitza un control unipolar del pont en H que proporciona un control independent de cada branca del pont exposat a la Figura 5-16.

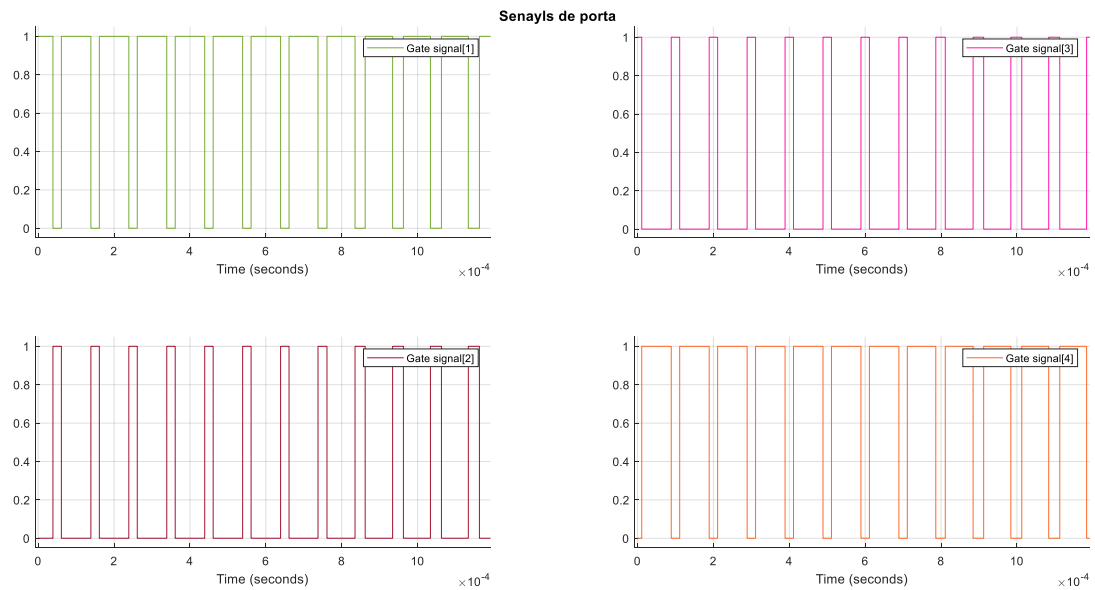


Figura 5-16: Senyals de porta del pont en H.

Es realitza una segona simulació sota les mateixes condicions però amb 0,55 segons de durada.

En aquesta nova simulació, amb una finestra més ample de temps, s'observa l'evolució del control PI de corrent i com arriba a la consigna desitjada en un temps de mig segon representat a Figura 5-17.

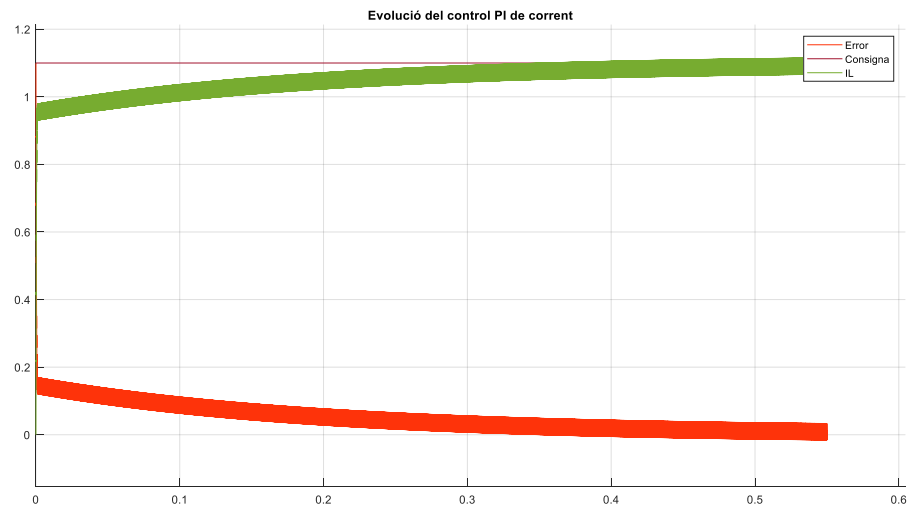


Figura 5-17: Evolució del control PI de corrent.

5.10.2. Simulació sense el pont en H

En aquest apartat es realitza una simulació del sistema simplificant el pont en H a través d'una

font de tensió variable que simula la tensió mitja generada pel pont en H. Aquesta simplificació del sistema redueix el temps que triga en realitzar una simulació completa, d'hores a pocs minuts. Això es deu a que no s'ha de computar les commutacions que realitza el pont en H.

5.10.2.1. Configuració del model

El model simulat és el presentat a la Figura 5-18. Els paràmetres que presenta el model són els raonats al llarg del treball i compta amb nombroses sortides de visualització de senyals per corroborar el seu funcionament.

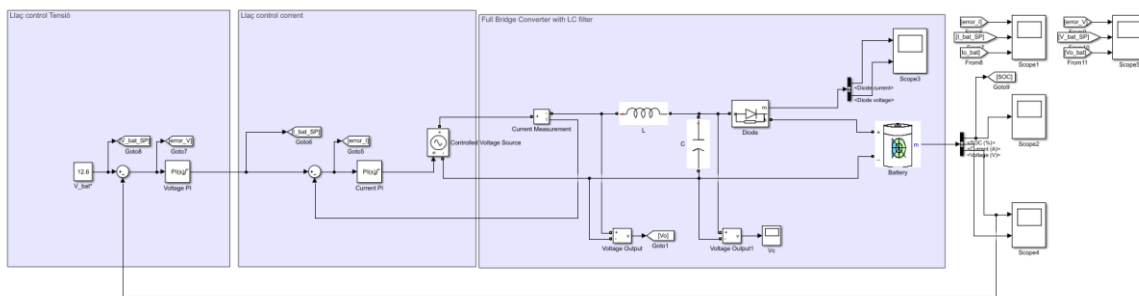


Figura 5-18: Model simplificat simulat

5.10.2.2. Simulacions

Amb aquest nou model s'ha realitzat una primera simulació amb el corrent de càrrega limitat a 1,1 A (càrrega estàndard) fins que l'estat de càrrega ha arribat al 97%. Posteriorment, una segona simulació limitant el corrent a 2,2 A (càrrega ràpida), fins el 97% de bateria. Aquestes simulacions permeten realitzar una comparació de les corbes d'estat de càrrega, tensió i corrent de la bateria representada a la Figura 5-19.

S'observa com un cop la bateria arriba a la tensió màxima, el corrent absorbit va disminuint paulatinament en el temps fins arribar a fer-se zero. En el moment que el corrent arriba a valors molt pròxims a 0 A es dona la bateria per carregada tot i que resti per carregar un 3% de la seva capacitat. Quan el corrent comença a disminuir la velocitat de càrrega també ho fa, sent aquesta última etapa de la càrrega la més lenta.

Segons el fabricant amb càrrega estàndard, el temps d'una càrrega completa es situa al voltant de 3 hores, mentre que amb càrrega ràpida es de 2 hores i mitja. La simulació mostra temps de càrrega de 2,7 hores i 1,8 hores, respectivament. Son temps de càrrega inferiors als donats pel fabricant. Això denota que el model de la bateria no es perfecte, però es una bona aproximació per entendre el funcionament de la bateria que es vol utilitzar i que si fos

necessari, tot i la falta d'informació per part del fabricant, es podria calibrar millor el model per obtenir resultats més fidels.

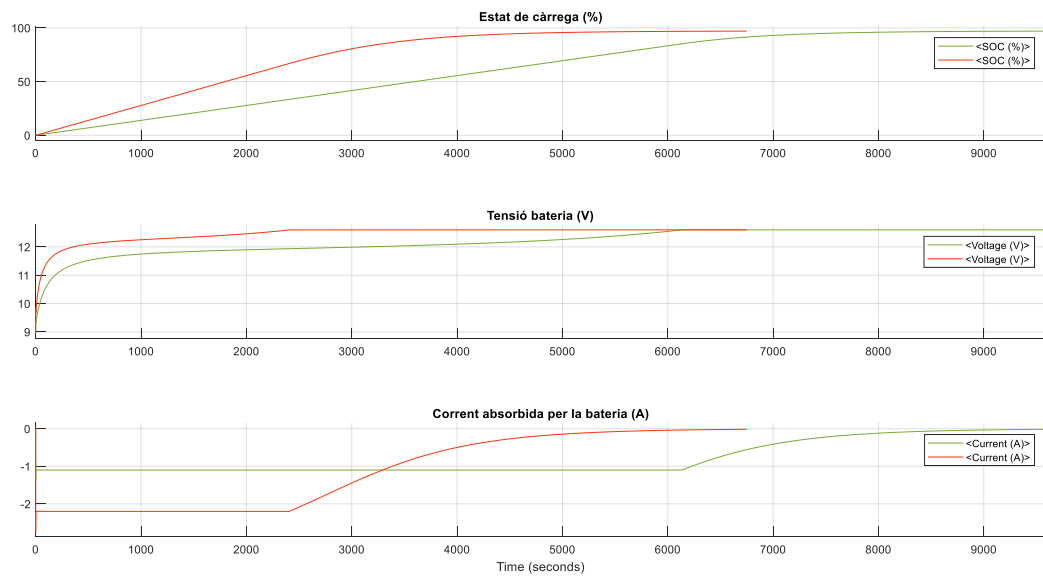


Figura 5-19: Comparatiu entre càrrega estàndard, en verd, i càrrega ràpida, en taronja.

5.10.3. Simulació descàrrega bateria

Aquesta simulació valida els valors escollits de la resistència per dissipar l'energia de la bateria.

5.10.3.1. Configuració del model

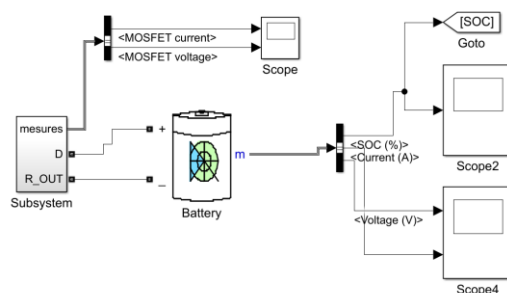


Figura 5-20: Model per la simulació de descàrrega de bateria.

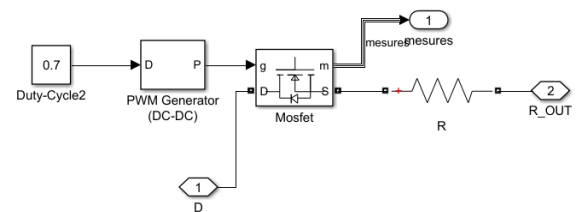


Figura 5-21: Model del subsistema de la Figura 5-20.

Per realitzar la simulació de descàrrega de bateria s'utilitza el model presentat a la Figura 5-20 i Figura 5-21. Es tracta de la bateria connectada en paral·lel amb la bateria amb un interruptor controlat amb el qual es pot decidir el ritme de descàrrega i aproximar la descàrrega a la corba que es desitgi. Es un sistema simple a llaç obert que compleix la seva funció.

5.10.3.2. Simulacions

Els valors de resistència més propers al resultat obtingut en els càlculs realitzat en apartats anteriors són $3,3 \Omega$ i 4Ω . S'ha realitzat una simulació amb cadascun d'aquests valors amb un cicle de treball de valor 1 obtenim les corbes mostrades a la Figura 5-22.

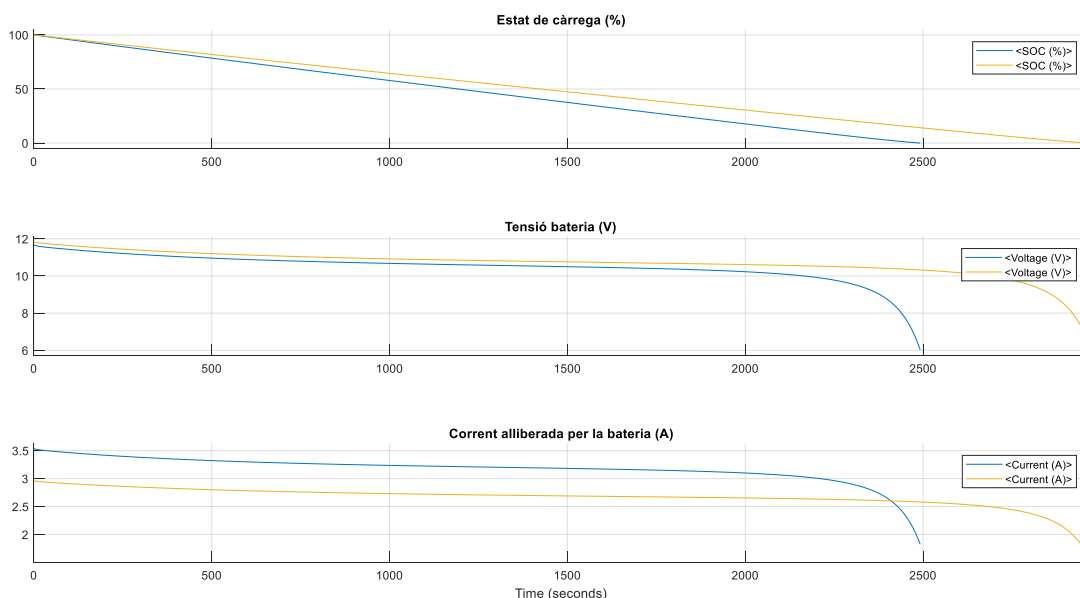


Figura 5-22: Corbes de descàrrega de la bateria. En groc, utilitzant una resistència de $3,3 \Omega$. En blau, utilitzant una resistència de 4Ω . Cicle de treball constant màxim en ambdós casos.

Com es pot veure, ambdues resistències, tot i treballar al màxim cicle de treball, compleixen amb mèrits la seva funció. En el pitjor dels casos el corrent màxim que allibera la bateria és de 3,5 A, tenint en compte que el corrent màxim que pot suportar és de 4,4 A. El fet d'escollir un valor o un altre només variarà el temps que triga en dissipar tota l'energia.

Per millorar aquests temps de descàrrega es podria fer utilitzant una resistència d'un valor més petit amb un controlador i un sensor de corrent per tancar el llaç de control per no superar el valor límit que indica el fabricant.

5.10.4. Conclusió de les simulacions

A partir de les simulacions realitzades s'arriba les següent conclusions:

Els valors calculats de la inductància i condensador del filtre són adients per l'aplicació proposada. No obstant, com ja s'ha mencionat, a l'hora d'estimar el valor de la inductància es va suposar que la planta del sistema estava formada per la inductància per simplificar els càlculs, durant les simulacions s'ha vist que l'arissat de corrent es molt més petit que l'esperat. Així doncs, el valor de la inductància es podria disminuir i per tant el valor del condensador també. Això es degut que el valor de la capacitat es calcula en funció de la inductància. Com a conseqüència directe, el cost econòmic d'aquests components disminuiria.

El temps de càrrega estàndard i ràpida obtingut a les simulacions dista lleugerament amb el donat pel fabricant. Es creu que l'element bateria no esta ben calibrat a la simulació, degut a la falta de dades al full d'especificacions del fabricant de la bateria. No obstant, tot i aquest error dels temps de càrrega entre els valor teòrics de la simulació i el full d'especificacions, el resultat obtingut es una aproximació adequada per aquest propòsit i s'observen amb claredat les corbes d'estat de càrrega, tensió i corrent de la bateria durant el procés de càrrega. Per uns resultats més acurats es podria tractar de modificar els paràmetres per aproximar encara més el comportament de l'element de la bateria en la simulació amb el comportament teòric de la bateria real.

Els controladors PI estan adequadament sintonitzats i tenen una resposta força ajustada per al seu propòsit. Responen amb la velocitat adequada i mostren el comportament esperat realitzar el sistema de càrrega CC-CV.

Per últim, es conclou en el cas del sistema de descàrrega de la bateria, com ja s'ha comentat, els dos valors proposats de la resistència per dissipar tota l'energia compleixen el seu propòsit amb garanties. No obstant, com s'ha comentat es podria utilitzar un controlador, una resistència d'un valor més baix juntament amb un sensor de corrent que tanqués el llaç de control per tal de garantir no sobrepassar els valors recomanats pel fabricant per millorar el temps de descàrrega.

6. Implementació

A partir de les simulacions realitzades i coneixent els elements que incorpora el TestBed s'estudia com implementar aquest nou sistema aprofitant tots els elements possibles i incorporant els nous necessaris.

A l'Annex 3: Esquemàtics TestBed, es troben els esquemes del TestBed als qual es farà referència en aquest capítol.

6.1. Viabilitat

El TestBed compta amb un pont trifàsic complet, Figura 6-1. D'aquest, es poden utilitzar dues de les seves fases per obtenir el pont en H que es vol fer servir per a la nova plataforma.

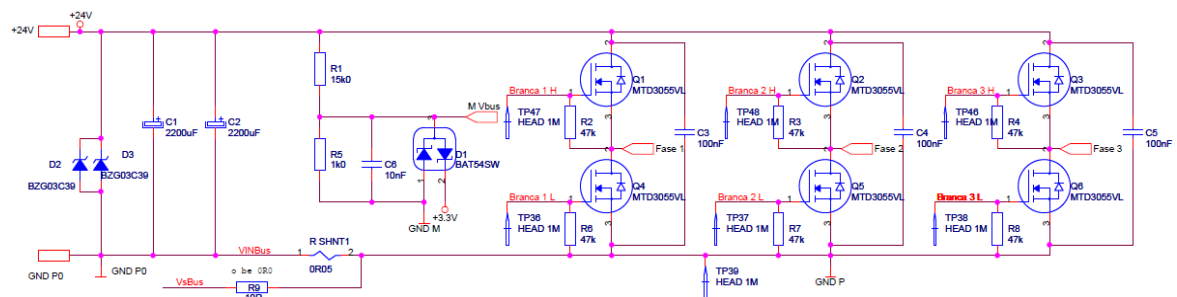


Figura 6-1: Pont trifàsic complet de la placa de potència.

Observant els esquemes, es troba que no hi ha connectors en els punt Fase 1, Fase 2 o Fase 3. Entre dos d'aquests punts, per exemple, Fase 1 i Fase 2, és la sortida del pont en H on es realitzaria la connexió del filtre, amb el sistema de descàrrega en paral·lel amb la bateria. Al no existir aquests connectors involucra haver de realitzar soldadures amb cables a l'aire.

Per evitar problemes de commutació, en la tercera branca que no s'utilitza, s'hauria d'anular per software però si es vol actuar amb la major seguretat seria recomanable desactivar la tercera branca retirant les resistències de porta per evitar una commutació no desitjada.

El sistema de descàrrega de bateria incorpora un interruptor controlat, aquest es troba flotant entre el bus positiu i negatiu, al trobar-se en paral·lel amb la bateria, tal com mostra la Figura 6-2. Aquest fet provoca la necessitat d'utilitzar *drivers* aïllats amb una font de tensió aïllada degut a que no està referenciat a la mateixa massa ni té una tensió constant entre porta-font. Aquest nou *driver* haurà de rebre el senyal de control per part del DSP. Serà necessari alliberar del TestBed el senyal PWM6 per emprar-lo amb el nou *driver*.

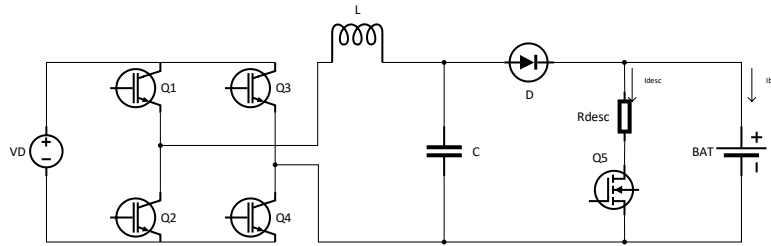


Figura 6-2: Esquema del muntatge.

Cadascuna de les fases del pont trifàsic incorpora un circuit per la mesura de corrent utilitzant resistències de shunt. Utilitzant el circuit de la Fase 1, corresponent a la branca A del pont trifàsic, serveix per tancar el llaç de control de corrent. Senyals VIN1 i VS1 de l'esquema Mesures.

D'altra banda, per mesurar la tensió de la bateria es necessita un element extern al TestBed com pot ser un sensor de tensió i anul·lar un senyal de mesura del TestBed per aprofitar el pin d'entrada de senyal al DSP i tancar el llaç de control de tensió.

Serà necessari construir, apart, en una PCB, el filtre LC, el sistema de descàrrega i el sensor de tensió juntament amb els circuits auxiliars necessaris pel seu funcionament. La connexió entre TestBed i la nova plataforma al no comptar amb connectors d'accés ràpid en els punts necessaris complicarà aquesta construcció.

6.2. Conclusions de la viabilitat del projecte

Construir aquesta nova plataforma aprofitant el TestBed és factible, però implica la inhabilitació de diversos components, tant de potència com de mesura, per assegurar el funcionament de la nova plataforma. A més, la connexió entre la construcció que s'ha de realitzar amb el filtre i la resta de components s'ha de connectar amb el TestBed mitjançant soldadura de cables al aire. Aquest fet no dóna robustesa ni fiabilitat a la nova plataforma.

Com ja s'ha esmentat en capítols anteriors el TestBed es va dissenyar per la docència en control de motors i com a tal realitza la seva funció de forma satisfactòria, però, l'aprofitament d'aquesta per una plataforma d'assaig de bateries involucra nombrosos canvis en la placa de potència que acabaria per inhabilitar el propòsit per al qual es va dissenyar. Per aquesta raó, es proposa la construcció d'una placa de potència específica per la nova plataforma d'assaig de bateries, en la qual sí que s'aprofita la placa de control eZdsp TMS320F2812 per gestionar les senyals de control i mesura de la plataforma que es vol construir.

Conclusions

El món tracta de reduir les emissions de gasos hivernacle prenent diferents mesures al respecte, la més notable és el canvi del model energètic actual, que camina cap a la producció d'energia renovable distribuïda. Les energies renovables tenen el handicap de que no són sistemes de generació d'energia sota demanda, en aquest punt és on emmagatzemar energia adquireix especial interès. L'ús de bateries electroquímiques és una solució per emmagatzemar aquesta energia. Les bateries electroquímiques, tenen la particularitat, a diferència d'altres sistemes d'emmagatzematge d'energia, que poden ser utilitzades per aplicacions no estacionaries, com són els vehicles elèctrics que tant interès està suscitant en els últims anys. No obstant, les bateries no són perfectes, la densitat d'energia, la vida, entre altres paràmetres que presenten es poden millorar i des de les indústries fabricants de bateries s'estan fent grans esforços per millorar les tecnologies que hi ha darrera de les bateries electroquímiques.

Per els motius donats aquest treball proposa la creació d'una eina docent per facilitar l'assaig de bateries que faciliti l'estudi del comportament d'aquestes i permeti formar als estudiants en aquest camp tant rellevant en el present i futur.

Els objectius del treball han sigut la realització d'un estudi del estat actual dels sistemes d'emmagatzematge d'energia, el disseny i construcció d'una plataforma per l'assaig de bateries, que permeti realitzar cicles de càrrega i descàrrega, fent ús d'una plataforma existent per simplificar l'etapa d'implementació de la nova eina.

L'estudi realitzat sobre l'estat actual dels sistemes d'emmagatzematge d'energia mostra com els sistemes mecànics són els que presenten, potser, l'estat de tecnologia més madura, en especial el PHS. Per una altra banda, els sistemes químics i elèctrics són els que més recorregut els hi queda per assolir aquesta maduresa. En el present, els sistemes de bateries electroquímiques, BESS, són els que susciten major interès, degut a que són els que major energia pot emmagatzemar amb un pes i preu més reduït. El fet de comptar amb una relació pes-potència reduït, en comparació amb la majoria dels altres sistemes, facilita l'ús d'aquesta tecnologia per usos portàtils.

El TestBed és una eina multi-propòsit per aplicacions de control de motors de corrent continu. Compta amb etapes de potencia i mesura que faciliten l'aprenentatge de programació DSP a través de la placa de control que permet actuar sobre els motors de la forma desitjada.

La nova plataforma es dissenya per a una bateria composta per tres cel·les en sèrie d'ió-liti, en concret el model ICR18650-22E del fabricant Samsung. L'objectiu d'aquesta plataforma és poder realitzar cicles de càrrega i descàrrega controlats de la bateria. Per el sistema de càrrega de la bateria s'utilitza un convertidor estàtic amb la topologia de pont en H amb un

filtre LC. I per al sistema de descàrrega, al no comptar amb una font bidireccional, s'opta per dissipar l'energia a través d'una resistència per efecte Joule.

Segons les simulacions realitzades, el sistema dissenyat compleix amb les funcions desitjades i els valors de la inductància, capacitat i resistència són adequats, tot i que aquests es podrien disminuir en tots els casos per reduir cost en el cas de la inductància i per millorar el temps de descàrrega en el cas de la resistència, tot i que involucraria millorar el sistema de control de la descàrrega per evitar que la bateria superi els valors recomanats pel fabricant.

Tanmateix, les simulacions validen el disseny dels controladors PI. La resposta que donen davant els canvis de tensió confirmen que el càlcul dels paràmetres són correctes per als controls de corrent i tensió.

Estudiant la possibilitat d'aprofitament de la placa de potència TestBed s'arriba a la conclusió que és factible construir una plataforma nova aprofitant l'existent però quedaria un conjunt poc robust i poc fiable, degut a la quantitat de soldadures a l'aire que s'haurien de realitzar davant la falta de connectors que facilitin l'accés als punts de connexió que es necessitarien. A més, per motius de seguretat s'haurien de modificar alguns circuits per el qual la plataforma docent per al control de motors quedaria inhabilitada per al seu propòsit original.

Per aquestes raons es proposa la construcció de la plataforma estudiada de forma individual aprofitant la placa de control que incorpora el DSP. D'aquesta manera la nova plataforma es podrà adequar millor al seu propòsit de facilitar l'estudi del comportament de bateries electroquímiques i facilitar la docència en aquest camp.

Agraïments

M'agradaria donar les gràcies a Daniel Montesinos per donar-me la possibilitat de fer aquest treball i a Francisco Diaz per guiar-me durant aquests mesos. Als companys del CITCEA per acollir-me i ajudar-me.

Agrair a la meva parella, per la seva paciència, ajuda i suport.

Als meus pares pel seu suport i confiança incondicional.

Gràcies.

Bibliografia

- [1] United Nation Framework Convention on Climate Change, «The Paris Agreement,» [En línia]. Available: <http://unfccc.int>. [Últim accés: 18 11 2017].
- [2] World Energy Council; ATKearney, «Global Energy Transitions,» 2014. [En línia]. Available: <https://www.atkearney.com/documents/10192/5293225/Global+Energy+Transitions.pdf/220e6818-3a0a-4baa-af32-8bfbb64f4a6b>. [Últim accés: 18 11 2017].
- [3] A. Gray, «World Economic Forum,» [En línia]. Available: <https://www.weforum.org/agenda/2017/09/countries-are-announcing-plans-to-phase-out-petrol-and-diesel-cars-is-yours-on-the-list/>. [Últim accés: 18 11 2017].
- [4] Boston Consulting Group, «Batteries for Electric Cars: Boston Consulting Group,» [En línia]. Available: <https://www.bcg.com/documents/file36615.pdf>. [Últim accés: 18 11 2017].
- [5] European Commission , «Energy storage - the role of electricity: European Commission,» 1 2 2017. [En línia]. Available: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/swd2017_61_document_travail_service_part1_v6.pdf. [Últim accés: 18 11 2017].
- [6] Z. Tianwen, C. Laijun i M. Shengwei, «Control strategy and application of power converter system in battery energy storage system,» de *Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), 2014 IEEE PES*, Istanbul, 2014.
- [7] F. Díaz-González, A. Sumper i O. Gomis-Bellmunt, *Energy Storage in Power Systems*, Wiley, 2016.
- [8] A. Alhamali, M. E. Farrag i G. Bevan, «Review of Energy Storage Systems in electric grid and their potential in distribution networks,» de *Power Systems Conference (MEPCON), 2016 Eighteenth International Middle East*, Cairo, 2016.
- [9] Voltium, «CAES: Sistema de almacenado de aire comprimido,» 30 11 2015. [En línia]. Available: <https://www.voltium.es/articulos-tecnicos/caes-sistema-almacenado-aire>. [Últim accés: 19 11 2017].

- [10] D. Connolly, «A Review of Energy Storage Technologies: For the integration of fluctuating renewable energy,» 12 2010. [En línia]. Available: [http://vbn.aau.dk/en/publications/a-review-of-energy-storage-technologies\(52e25c4a-608b-4914-8644-3a9998a4de7d\).html](http://vbn.aau.dk/en/publications/a-review-of-energy-storage-technologies(52e25c4a-608b-4914-8644-3a9998a4de7d).html). [Últim accés: 20 11 2017].
- [11] Energy and Power Group, «Energy Storage: Electrical energy storage,» [En línia]. Available: <http://epg.eng.ox.ac.uk/content/energy-storage>. [Últim accés: 21 11 2017].
- [12] S. Evanczuk, «Constant-Voltage/Constant-Current Devices Optimize Li-Ion Battery Charging for Energy-Harvesting,» 28 11 2012. [En línia]. Available: <https://www.digikey.com/en/articles/techzone/2012/nov/constant-voltageconstant-current-devices-optimize-li-ion-battery-charging-for-energy-harvesting>. [Últim accés: 24 11 2017].
- [13] A. Namboodiri i H. S. Wani, «Unipolar and Bipolar PWM Inverter,» *IJRST*, vol. 1, pp. 238-240, 2014.
- [14] N. Mohan, T. M. Undeland i W. P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications and Design*, Wiley, 2002.
- [15] Battery University Group, «BU-903: How to Measure State-of-charge; Explore SoC measurements and why they are not accurate.,» [En línia]. Available: http://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_measure_state_of_charge. [Últim accés: 01 12 2017].
- [16] Z. Yu, R. Huai i L. Xiao, «State-of-Charge Estimation for Lithium-Ion Batteries Using,» *energies*, núm. 8, pp. 7854-7873, 2015.
- [17] A. Som, «Greyb Services: How to stop lithium-ion batteries explosion due to thermal runaway?,» 12 05 2017. [En línia]. Available: <https://www.greyb.com/prevent-thermal-runaway-problem-li-ion-batteries/>. [Últim accés: 21 12 2017].